

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Problematika rezonancí v napájecí soustavě
elektrické vozby**
**Resonance in Electric Railways Power
Supplying System**

2010

Bc. Vojtěch Kuchař

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektroniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Vojtěch Kuchař**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Problematika rezonancí v napájecí soustavě elektrické vozby**
Resonance in Electric Railways Power Supplying System

Zásady pro vypracování:

1. Rušivé vlivy polovodičových měničů
2. Rezonance v napájecím obvodu 1-fázové vozby
3. Měření na vybrané transformovně
4. Vyhodnocení měření

Seznam doporučené odborné literatury:

Podle pokynů vedoucího diplomové práce

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Josef Paleček, CSc.**

Datum zadání: 20.11. 2009
Datum odevzdání: 07.05. 2010

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.
Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Poděkování:

Chci poděkovat svému vedoucímu diplomové práce prof. Ing. Josefu Palečekovi, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi pomohly k vytvoření této práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Jaroslavu Pospíškovi za zprostředkování měření a pracovníkům ČD za výbornou spolupráci v trakční napájecí stanici Blansko.

Datum odevzdání:

Podpis:_____

Abstrakt

Diplomová práce „ Problematika rezonancí v napájecí soustavě elektrické vozby “ se zabývá problematikou vyšších harmonických a vzniku rezonancí ve střídavém trakčním obvodu 25 kV 50 Hz. Popisují zde postup výpočtu rezonanční frekvence a součinitele zvýšení proudu v závislosti na vzdálenosti vozidla od napájecí stanice, vlivu filtračně kompenzačního zařízení s ním i bez něj. Dále popisují rušivé vlivy pulzních měničů na napájecí síť a uvádím, jaké vlivy toto rušení může mít na elektrická zařízení. Zároveň se věnuji i způsobům omezení vyšších harmonických v elektrické síti. Nejzajímavější částí této práce je praktické měření provedené v trakční napájecí stanici ČD v Blansku, za účelem ověření výskytu rezonancí v trakčním obvodu a měření vyšších harmonických v trakčním i napájecím vedení.

Klíčová slova

Rezonance, vyšší harmonická, trakční vedení, rušivé vlivy, pulzní měnič, trakční napájecí stanice, filtračně-kompenzační zařízení.

Abstract

The goal of thesis „ The problems of resonances in feed array of electric bindings “ is applied to problems of emergence of higher harmonic resonance and emergence of resonance in alternate traction circuit 25kV 50Hz. I hereby describe the procedure of calculation of resonance frequency and coefficient of increment depending upon distance of vehicle from feeding station, influence of filter-compensational mechanism with and without it. I also outline disruptive influencies of chopper converters on supply network and present what influencies this disruption may cause on electric mechanism. At the same time, I work on the ways of higher harmonic restrictions in electrical network. The most interesting part of my thesis is practical measurement carried out in traction feeding station in ČD Blansko in order to verify emergence of resonance in traction circuit and the measurement of higher harmonic resonances in traction and feeding line.

Key words

Resonance, harmonics, traction management, interference, pulse converter, substations, filter-compensating device.

Seznam použitých symbolů a zkratek

Symbol	Název	Jednotka
a	fázová konstanta	(-)
A, B, C, D	Blondelovy konstanty	(-)
b	konstanta tlumení	(-)
C	kapacita	(F)
C_0	měrná kapacita trakčního vedení	(F/km)
f	frekvence	(Hz)
g	součinitel šíření rozruchu	(-)
G_V	vstupní vodivost	(S/km)
G_0	měrný svod trakčního vedení	(S/km)
i, I	fázový proud střídavého napájecího zdroje – okamžitá, ef. hodnota	(A)
i_1, I_1	první (základní) harmonická proudu – okamžitá, ef. hodnota	(A)
i_K, I_K	k-tá harmonická fázového proudu – okamžitá, ef. hodnota	(A)
i_n, I_n	n-tá harmonická fázového proudu – okamžitá, ef. hodnota	(A)
I_c	proud protékající kondenzátorem	(A)
I_{cn}	celkový proud n-té harmonické od více měničů	(A)
k_μ	korekční koeficient vlivem úhlu komutace	(-)
K	součinitel zvýšení proudu	(-)
l_c	celková délka trakčního obvodu	(km)
l_e	délka energetického vedení 110 kV	(km)
l_T	délka trakčního obvodu	(km)
L	indukčnost	(H)
L_{SS}	indukčnost ve stejnosměrném obvodu	(H)
L_{VS}	indukčnost na vstupních svorkách měniče	(H)
L_0	měrná indukčnost trakčního vedení	(H/km)
n	řád harmonické (i jako index)	(-)
N	délka napájeného úseku	(km)
N_K	celková délka napájeného úseku	(km)
p	převod transformátoru, pulznost měniče	(-)
Q_C	výkon kondenzátoru	(var)
Q_{max}	maximální výkon kondenzátoru	(var)
R_0	měrný odpor trakčního vedení	(Ω)
S_{ks}	zkratový výkon sítě	(VA)
U_n	jmenovité napětí	(V)
v_T	rychlost šíření v trakčním vedení	(km/s)
v_e	rychlost šíření ve vedení 110 kV	(km/s)
X_T	náhradní reaktance transformátoru	(Ω)
Y_{CF}	admitance kompenzačního kondenzátoru	(S)
Z	impedance	(Ω)
Z_F	impedance filtru	(Ω)
Z_{Ff}	impedance větve L-C při kmitočtu f	(Ω)
Z_n	impedance n-té harmonické	(Ω)
Z_s	impedance nadřazené soustavy	(Ω)

Z_T	náhradní impedance transformátoru	(Ω)
Z_{ve}	vstupní impedance zkratovaného vedení 110 kV	(Ω)
Z_{ve0}	vlnová impedance vedení 110 kV	(Ω /km)
Z_{vT}	vstupní impedance pro otevřené trakční vedení	(Ω)
Z_{vT0}	vlnová impedance trakčního vedení	(Ω /km)
α	úhel řízení	(-)
$\cos\varphi_{(1)}$	účinník první (základní) harmonické	(-)
μ	úhel komutace	(-)
ζ	koefficient pro výpočet součtového proudu od více měničů	(-)
φ_n	fázový posun n-té harmonické	(-)
ω	úhlová rychlost	(rad/s)
EMC	elektromagnetická kompatibilita	
FKZ	filtračně-kompenzační zařízení	
SF_6	fluorid sírový	
SS	stejnoseměrná napájecí soustava	
ST	střídavá napájecí soustava	
THD	činitel harmonického zkreslení	
TNS	trakční napájecí stanice	

Obsah

Úvod	1
1. Rušivé vlivy polovodičových měničů	4
1. 1. Vyšší harmonické proudy usměrňovačů	5
1. 1. 1. Idealizované průběhy.....	5
1. 1. 2. Vliv úhlu komutace na vyšší harmonické proudy	6
1. 1. 3. Vliv zvlnění ve stejnosměrném obvodu na vyšší harmonické proudy	7
1. 1. 4. Vliv nesymetrie na velikost vyšších harmonických proudů.....	7
1. 1. 5. Vliv úhlu řízení.....	7
1. 1. 6. Současná práce více měničů	8
1. 2. Změny napětí, způsobené měniči v napájecí síti	9
1. 2. 1. Impedance sítě.....	6
1. 2. 2. Vyšší harmonické napětí.....	8
1. 3. Způsoby minimalizace harmonických.....	12
1. 3. 1. Omezení vyšších harmonických bez pomoci přídavných zařízení.....	9
1. 3. 2. Omezení vyšších harmonických s pomocí přídavných zařízení.....	11
1. 3. 3. Dynamická kompenzace účinníku	12
1. 4. Vliv harmonických na napájená elektrická zařízení.....	18
2. Rezonance v napájecím obvodu 1-fázové vozby.....	20
2. 1. Odvození rezonanční frekvence a součinitele zvýšen proudu pro hnací vozidlo umístěné na vzdáleném konci napájeného úseku	20
2. 2. Odvození rezonanční frekvence u součinitele zvýšení proudu pro hnací vozidlo umístěné v libovolném bodu napájeného úseku	26
2. 3. Odvození rezonanční frekvence bez kompenzace	29
2. 4. Odvození rezonanční frekvence s kompenzací.....	34
3. Měření v trakční napájecí stanici Blansko.....	37
4. Závěr:	46
5. Použitá literatura	
6. Seznam příloh	

Úvod

V České republice je v současné době elektrifikováno asi 35 % tratí. Severní část České republiky je elektrifikována stejnosměrnou soustavou 3 kV (elektrifikováno asi 1700 km tratí), jižní část funguje na střídavé soustavě 25 kV, 50 Hz (elektrifikováno asi 1200 km tratí). Na území České republiky se nacházejí i jiné soustavy, které nejsou tak rozšířené, a to trať Tábor – Bechyně a Rybník – Lipno elektrifikované stejnosměrnou soustavou 1500 V. Propojení s Rakouskou železniční sítí zajišťuje trať Znojmo – Šatov – Retz, která je elektrifikována systémem 15 kV, 16,7 Hz. Trakční soustavy a rozložení tratí sítě Českých drah je zobrazena na obr. 1.

Není jednoznačně určitelné, která ze dvou nejpoužívanějších napájecích soustav u Českých drah (SS 3 kV; ST 25 kV, 50 Hz), je lepší. Z provozního hlediska má každá soustava svoje výhody a nevýhody. Střídavá soustava vyžaduje přídavné zařízení, jednak pro kompenzaci špatného účinníku, a zařízení na eliminaci proudových harmonických vytvářenými střídavými lokomotivami, které se pak dále šíří do distribuční sítě. Střídavá soustava pracuje podobně jako jednofázový spotřebič, tudíž u distribuční sítě hrozí napětová nesymetrie. Stejnosměrná soustava naopak pracuje jako symetrická zátěž. Velikost účinníku se pohybuje kolem předepsané hodnoty 0,98. Náklady na stavbu stejnosměrných tratí jsou oproti střídavým tratím o něco větší, a to z důvodu většího průřezu trolejového vedení a nutnosti častějších napájecích stanic. Při porovnání těchto aspektů se v dnešní době jeví jako výhodnější trať napájené střídavou soustavou.

Jak již bylo řečeno, střídavá trakční soustava Českých drah produkuje proudové harmonické. Střídavá soustava je napájena přes napájecí stanice, kterým říkáme trakční transformovny. Zpravidla jsou napájeny dvěma nezávislými linkami 110 kV, do kterých se přenáší rušení způsobené jízdou trakčních vozidel. Toto rušení vyvolává regulace výkonu u lokomotiv. U Českých drah se používají tyto tři základní principy regulace výkonu:

- Odporové – spínání odporových skupin v sérii s trakčním motorem nebo v obvodu buzení.
- Autotransformátorové – spínání odboček autotransformátoru.
- Bezkontaktní – v lokomotivě jsou dva polořazené (popřípadě celořazené) můstky, každý z těchto můstků napájí jeden nebo dva trakční motory (záleží na typu lokomotivy).

Využití výkonových prvků k řízení elektrických pohonů je dnes už velmi běžné. Díky stále lepší technologii tyristorových měničů se s ní budeme setkávat stále častěji. To má ale za následek provozní potíže způsobené jejich používáním. Proto se dnes velmi dbá na to, aby toto rušení bylo co nejmenší, nebo vůbec žádné. Tohoto problému si všimli již v 60. letech a byl zaveden pojem „elektromagnetická kompatibilita“ (EMC). Přesná definice zní: „EMC = schopnost zařízení nebo systému fungovat vyhovujícím způsobem ve svém elektromagnetickém prostředí bez vytváření nepřijatelného elektromagnetického rušení pro cokoliv v tomto prostředí“. Podcenění rušení může mít za následek špatnou funkci přístroje (stroj může vlastním rušením vyvolat svoji špatnou funkci) nebo poškození jiných přístrojů, což může vyvolat hospodářské škody.

Počty traťových kolejí, systémy trakčních proudových soustav a označení podle knižního lizního řádu

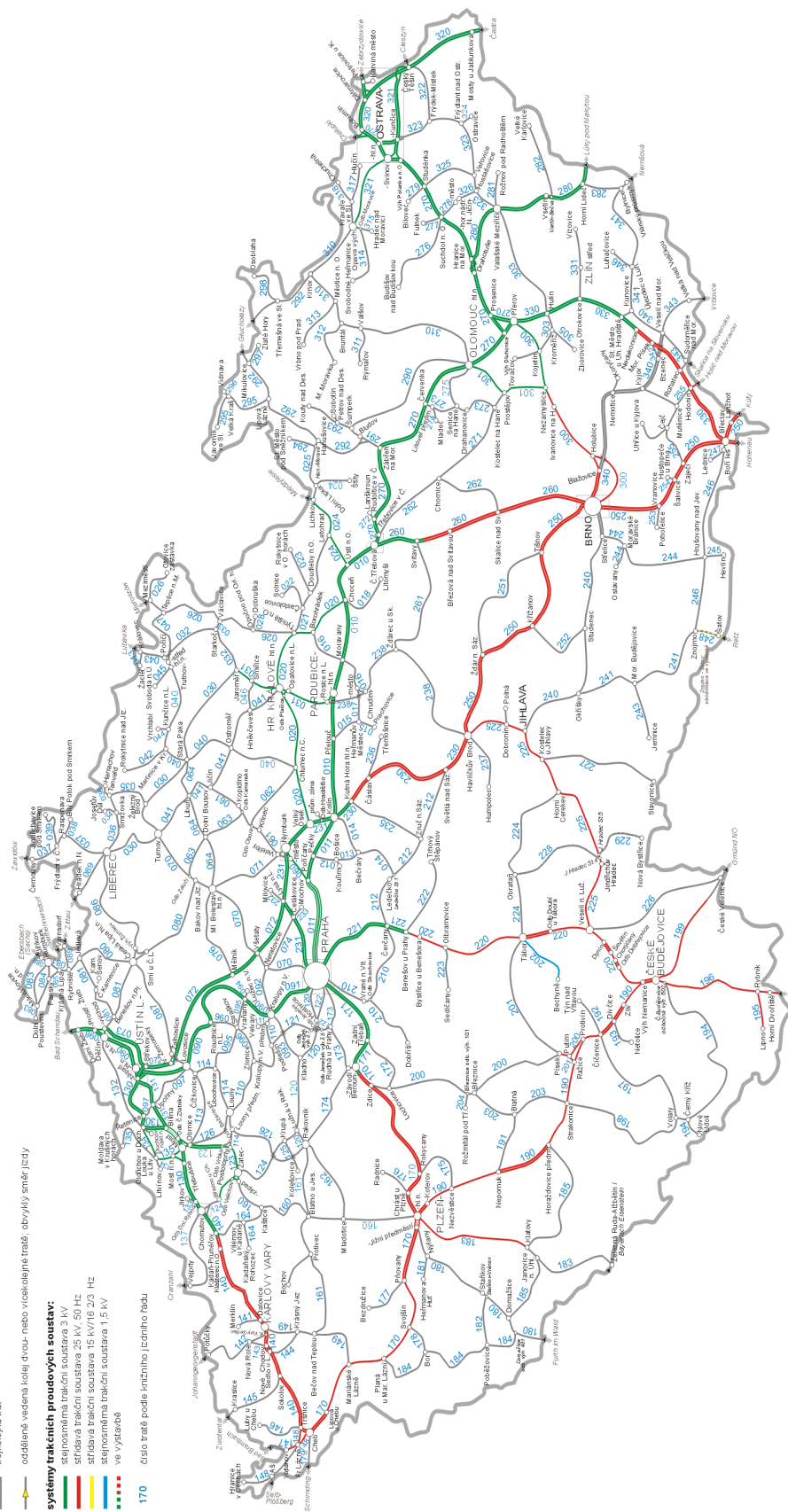
počty traťových kolejí:
 — elektrická trať
 — dieselová trať
 — trojkoľarňá trať

— oddělená vedená kolej dvou- nebo víceokojně tratí, obvyklý směr jízdy

systémy trakčních proudových soustav:

— stejnosměrná trakční soustava 3 kV
 — střídavá trakční soustava 25 kV/50 Hz
 — střídavá trakční soustava 15 kV/16 2/3 Hz
 — stejnosměrná trakční soustava 1,5 kV
 — ve výstavbě

170 číslo tratě podle knižního lizního řádu



Obr. 1 Trakční soustavy a rozložení tratí v České republice

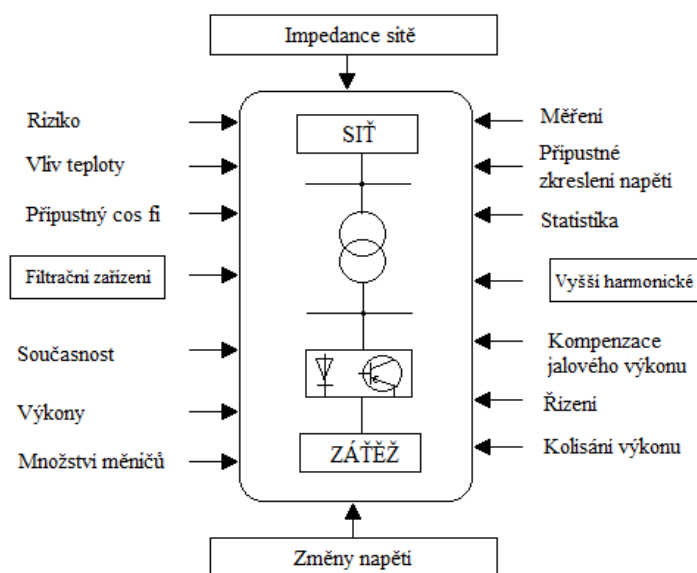
Základní typy rušivých jevů lze rozdělit do 5 oblastí:

- Nf rušení spjaté s napájecí sítí.
- Rušení zavlečené do systému z vnějšku (blesk) a VF rušení (přech. jevy na vedeních).
- Elektrostatické rušení (výboje).
- Magnetické rušení (síťového kmitočtu a impulsní magnetické pole).
- Elektromagnetické rušení (rozhlasové, televizní a telekomunikační vysílače, Vf rušení VN vedeními).

1. Rušivé vlivy polovodičových měničů [2],[3],[4]

V této kapitole je věnována pozornost nízkofrekvenčnímu rušení, spojenému s napájecí sítí. Při řešení otázek spjatých s nízkofrekvenčním rušením je nutné mít na zřeteli velké množství faktorů, které mají na uspokojivé výsledky vliv. Nejdůležitější z nich jsou ukázány na obr. 2. Z obrázku vyplývá, že v řešené problematice dominují zhruba čtyři základní okruhy:

- Vyšší harmonické napětí.
- Impedance sítě.
- Filtrační kompenzační zařízení, doplněné o dynamickou kompenzaci.
- Napěťová nesymetrie v síti.



Obr. 2 Přehled problematiky EMC v nřrušení

Poznatky o problematice vyšších harmonických proudů a jejich důsledků v napájecích soustavách, jakož i způsoby jejich minimalizace jsou poměrně rozsáhlé. Největší pozornost je věnována problematice usměřňovačů, které jsou zdrojem napětí pro stejnosměrné pohony. Je to dáno tím, že tyto měniče jsou v historickém žebříčku nejstarší a tudíž i výzkum negativních účinků usměřňovačů pro stejnosměrné pohony postoupil nejdále.

V případě nepřímých měničů kmitočtu s proudovým střídačem je v podstatě problém totožný s problematikou řízených usměřňovačů pro stejnosměrné pohony. Protože byly používány dosud především měniče s proudovými střídači, a to zejména u vyšších výkonů, nevznikly v této souvislosti nové problémy ani nová řešení, spjatá s problematikou vyšších harmonických proudů.

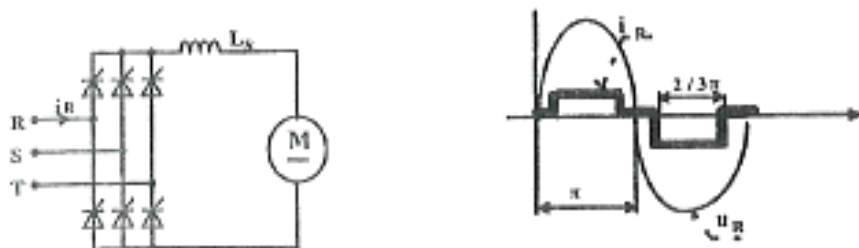
1. 1. Vyšší harmonické proudy usměrňovačů

1. 1. 1. Idealizované průběhy

Při zkoumání usměrňovačů jako zdrojů vyšších harmonických proudů, které jsou měničem odebrány ze sítě, zavedeme nejprve některé zjednodušující předpoklady:

- napájecí soustava je symetrická,
- na vstupu usměrňovače je napětí sinusové,
- indukčnost ve stejnosměrném obvodu $L_{ss} \rightarrow \infty$,
- zkratový výkon napájecí soustavy $S_{ks} \rightarrow \infty$, tj. vstupní indukčnost $L_{vs} \rightarrow 0$,
- zanedbáme ztráty usměrňovače.

Pro odvození velikosti proudů vyšších harmonických předpokládejme dále 3 fázový usměrňovač v můstkovém zapojení, měničový transformátor ve spojení Y/y. Pak dostaneme průběhy dle obr. 3. Z průběhů je vidět, že proud je značně deformovaný.



Obr. 3 Řízený usměrňovač a idealizovaný proud, který odebírá ze sítě

Provedením Fourierovy analýzy odebíraného proudu dostaneme:

$$i_R(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin \omega_1 t - \frac{1}{5} \sin 5\omega_1 t - \frac{1}{7} \sin 7\omega_1 t + \sin 11\omega_1 t + \dots) \quad (1)$$

Rozborem vztahu (1) zjistíme, že se zde objevují pouze vyšší harmonické určitých řádů n , a to: $n = kp \pm 1$,

kde k je celé číslo a p je pulznost usměrňovače. Harmonické, které splňují podmínky rovnice ($n = kp \pm 1$) se nazývají charakteristické harmonické. Dále zjistíme, že pro velikost vyšších harmonických proudů lze psát vztah

$$I_n = \frac{1}{n} I_1 \quad (2)$$

Vztah (2) bývá označován jako amplitudový zákon, platí ale i pro efektivní hodnoty vyšších harmonických proudů. Podobné výsledky bychom získali pro další zapojení usměrňovačů

a měničových transformátorů. Vztahy (1) a (2) platí obecně pro všechny měniče, které splňují předpoklady, uvedené v začátku této kapitoly.

V běžných případech plně postačí výpočet dle amplitudového zákona (2). Pokud přesto potřebujeme výpočty přesnější, lze respektovat velikost úhlu komutace měniče. U nejpřesnějších výpočtů, které se použijí v případě nových výrobků, nebo v případě měničů velmi velkých výkonů lze využít znalost vlivu zvlnění.

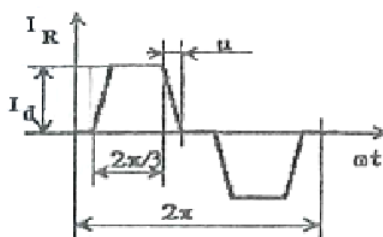
Pro úplnost je třeba uvést, že 3 fázové transformátory, jejichž úhly spojení jsou celými násobky 30° el., můžeme docílit pouze 12-ti pulzní spojení síťového proudu. Pro dosažení více pulzních průběhů je třeba použít speciální transformátory se vzájemným úhlem natočení menším, než 30° .

Smysl otáčení: vyšší harmonické proudy tvoří 3 fázovou soustavu, jejíž úhlová rychlost $\omega_n = n\omega_1$. Smysl otáčení vyšších harmonických je tedy takový, že

- harmonické řádu $n = kp + 1$ se otáčí kladným směrem,
- harmonické řádu $n = kp - 1$ se otáčí záporným směrem.

1. 1. 2. Vliv úhlu komutace na vyšší harmonické proudy

Vlivem indukčnosti v obvodu střídavého napětí (tj. zkratový výkon sítě $S_{KS} \neq \infty$) nemá proud odebíraný měničem ze sítě obdélníkový průběh. Po dobu komutace, kdy jsou dva polovodiče, připojené na různé fáze, současně vodivé, nastává přechod proudu z jednoho polovodiče na druhý. Elektrický úhel, během něhož komutace probíhá nazýváme úhlem komutace μ .



Obr. 4 Průběh proudu s respektováním uhlu komutace (průběh proudu při komutaci je linearizován)

Fourierovou analýzou proudu dle obrázku dostaneme:

$$i_R(t) = \frac{4I_d}{\pi\mu} \left[\frac{\sin\left(\mu + \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{6}\right)}{1^2} + \sin \omega_1 t + \frac{\sin 3\left(\mu + \frac{\pi}{6}\right) - \sin 3\left(\frac{\pi}{6}\right)}{3^2} + \sin 3\omega_1 t + \dots \right] \quad (3)$$

Po dalších úpravách je:

$$i_R(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_a \left(\sin \omega_1 t \frac{\sin \frac{\mu}{2}}{\mu} - \frac{1}{5^2} \sin 5\omega_1 t \frac{\sin \frac{5\mu}{2}}{\mu} - \frac{1}{7^2} \sin 7\omega_1 t \frac{\sin \frac{7\mu}{2}}{\mu} + \dots \right) \quad (4)$$

Srovnáním tohoto vztahu se vztahy 1 a 2 dostaneme

$$I_n = \frac{1}{n} I_1 k_\mu \quad \text{kde} \quad k_\mu = \frac{\sin \frac{n\mu}{2}}{\frac{n\mu}{2}} \quad (5)$$

Použití korekčního koeficientu, který se v literatuře objevuje i ve formě křivek použijeme v případě projektů, kdy potřebujeme přesnější výpočty. Obvykle tomu bývá z důvodu dodržení koeficientů zkreslení napětí. Negativním účinkem komutace je též zhoršení účinniku první harmonické.

1. 1. 3. Vliv zvlnění ve stejnosměrném obvodu na vyšší harmonické proudy

Proud ve stejnosměrném obvodu a tím i proud odebíraný měničem ze sítě není ideálně vyhlazený. Parametry reálného usměrňovače a skutečné zátěže potvrzují, že proud je určitým způsobem zvlněný. Protože pro vyjádření vyšších harmonických proudů je nutný velmi přesný výpočet, který je závislý na mnoha parametrech obvodu, je vhodné použít jako parametr zvlnění ve stejnosměrném obvodu. Výpočet vlivu zvlnění nelze řešit analyticky, je třeba použít numerické řešení.

1. 1. 4. Vliv nesymetrie na velikost vyšších harmonických proudů

Vztah ($n = kp \pm 1$) platí pro případ, že proudy polovodičů se cyklicky opakují ve stejném časovém sledu a mají stejnou dobu vedení. Není-li tento předpoklad dodržen, vyskytnou se i tzv. necharakteristické harmonické. Tento jev nastává při rychlých dynamických změnách nebo při nesymetrii mezi zdroji řídicích impulsů. Velikost proudů těchto harmonických je relativně malá a je prakticky úměrná velikosti nesymetrie řídicích impulsů. Vznikající proudy mohou být velmi rušivé. To se může projevit zejména při použití filtrů, kdy může docházet ke vzniku rezonance na frekvenci některé necharakteristické harmonické.

1. 1. 5. Vliv úhlu řízení

Regulací stejnosměrného napětí změnou úhlu řízení a se posune i účinník základní harmonické. Se vzrůstajícím úhlem řízení (max. do $\pi/2$) však klesá úhel komutace. Od $\pi/2$ pak úhel komutace opět vzrůstá. Při větším úhlu řízení (do $\pi/2$) se průběh proudu více blíží obdélníku. To znamená, že s růstem α (do $\pi/2$) se zvětšují velikosti vyšších harmonických proudů (pokud při výpočtu komutaci uvažujeme). Zůstává ovšem menší, než když vliv úhlu komutace zanedbáme.

1. 1. 6. Současná práce více měničů

Vliv úhlu řízení se projeví na velikosti vyšších harmonických proudů např. při současné práci dvou měničů, připojených na společných přípojnících. Lze předpokládat, že úhel řízení nebude stejný a jednotlivé vyšší harmonické proudy se budou sčítat vektorově. Pro zjednodušení předpokládejme práci dvou měničů se stejným zatížením. Rozdíl úhlů řízení je $\Delta\alpha$. Potom lze pro efektivní hodnotu výsledného vyšší harmonického proudu odvodit:

- a) při současné práci dvou měničů se zapojením usměřovačových transformátorů se vzájemným posuvem hodinových úhlů $\psi=0^\circ$.

$$I_{\Sigma n} = \left| 2I_n \cos \frac{n\Delta\alpha}{2} \right| \quad (6)$$

- b) při současné práci dvou měničů se zapojením usměřovačových transformátorů s posuvem hodinových úhlů $\psi = 30^\circ$. Pro harmonické řádu $n = 6k \pm 1$, kde k je sudé číslo platí vztah (6). Pro harmonické řádu $n = 6k \pm 1$, kde k je liché číslo platí

$$I_{\Sigma n} = \left| 2I_n \sin \frac{n\Delta\alpha}{2} \right| \quad (7)$$

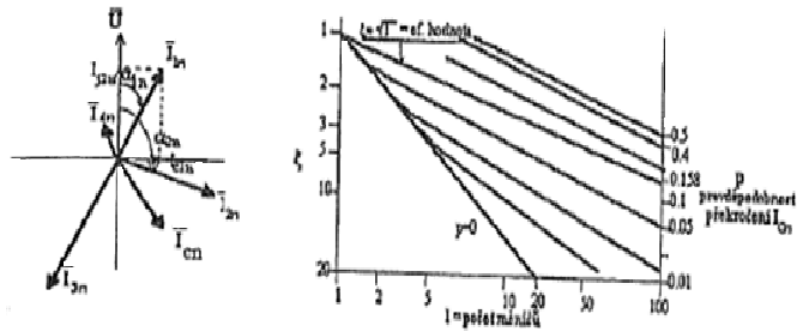
Z rovnice vyplývá, že při stejném úhlu řízení se odstraní 5. a 7. harmonická. Toho se s výhodou používá ke snížení negativních účinků u měničů velkých výkonů. Větší problém při výpočtu vyšších harmonických proudů nastává v případě, že je nutné řešit otázku více měničů, které jsou ze společné sítě napájeny. V praxi nejsou jednak dodrženy idealizující podmínky, jednak bývají měniče řízeny s různým úhlem řízení a jednak mají měniče různá zapojení. Výsledný proud n -té harmonické může nabývat hodnoty od 0 do hodnoty rovné algebraickému součtu proudů jednotlivých měničů. V praxi se velmi často využívá geometrický součet:

$$I_{cn} = \sqrt{\sum_{k=1}^l I_{kn}^2} \quad (8)$$

Zavedeme-li koeficient ξ , který bude udávat vztah mezi přesným, vektorovým součtem a hodnotou proudu vypočítanou dle (8), dostaneme:

$$\xi = \sqrt{\frac{(\sum_{k=1}^l I_{kn} \cos \alpha_k)^2 + (\sum_{k=1}^l I_{kn} \sin \alpha_k)^2}{\sum_{k=1}^l I_{kn}^2}} \quad (9)$$

Pro výpočet (9) je třeba znát rozložení α_k . Protože toto rozložení neexistuje, je nutné provádět velká množství měření statistického charakteru.



Obr. 5 a,b Proudly od více měničů a koeficient pro výpočet celkového proudu

Jednou z mála známých možností je použití křivek dle obr. 5b. Křivky udávají, jaká je pravděpodobnost, že dojde k překročení hodnoty $I_{Gn} = \xi I_{cpn}$, kde

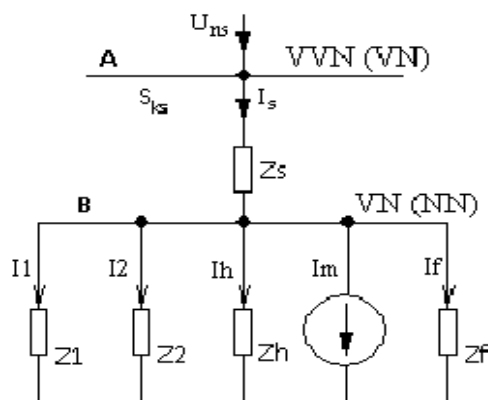
$$I_{cpn} = \frac{1}{\sqrt{l}} I_{cn} = \frac{1}{\sqrt{l}} \sqrt{\sum_{k=1}^l I_{kn}^2} \quad (10)$$

Pak postupujeme tak, že zvolíme určitou pravděpodobnost p a pro l zařízení najdeme koeficient ξ . Pomocí tohoto koeficientu pak vypočítáme hodnotu I_{Gn} .

1. 2. Změny napětí, způsobené měniči v napájecí síti

1.2.1. Impedance sítě

Pro vyšetřování vlivu polovodičového měniče na napájecí síť, vlivu filtrace a možnosti vzniku rezonance je třeba znát základní vlastnosti napájecí sítě. Zjednodušené schéma rozvodu el. energie je na obr. 6.



Obr. 6 Základní pojmy k výpočtu impedance sítě

Na sběrnici A předpokládáme zdroj velkého výkonu, takže můžeme předpokládat sinusové napětí s konstantní amplitudou. Na sběrnici B je toto napětí již zkresleno vlivem zátěžných impedancí $Z_1 - Z_h$, Tyto impedance mají obvykle induktivně odporový charakter, jejich účinník první harmonické $\cos\varphi_1$, navíc závisí na tom, zda je či není provedena individuální kompenzace. Impedance přívodní sítě Z_s je reprezentována napájecím vedením a hlavními transformátory. Jejich charakter je rovněž odporově - induktivní. V období malých zátěží pak může převládat vliv trvale připojených kapacit, jako jsou např. trvale připojené kondenzátory, kapacity kabelových vedení ap. Na sběrnici B je dále připojen polovodičový měnič, který je zdrojem vyšších harmonických proudů - obrázku je znázorněn zdrojem proudu. Současně ale odebírá první harmonickou proudu, která může být odebírána s proměnným účinníkem. Použitou filtračně - kompenzační jednotku můžeme znázornit impedancí Z_F .

Stanovení impedance závodové sítě je velmi složitou problematikou. V podstatě se jedná o tyto okruhy problémů:

- a) Tvorba náhradních modelů jednotlivých prvků el. soustavy.
- b) Zjednodušení daného modelu sítě, aniž by došlo k výrazným odchylkám ve výsledcích od modelu přesného.
- c) Použití výpočtové metody pro zjištění impedance v určených místech závodu.

Pro tvorbu náhradních schémat stačí použít zjednodušující modely. Jedná se o běžně používané vztahy. Jediný problém je s hodnotami impedance jednotlivých spotřebičů pro vyšší harmonické. Obecně totiž platí např. : $X_L = 2\pi fL$, ale dále je indukčnost funkcí frekvence. Totéž platí pro ostatní prvky rozvodu. Pro přesné výpočty (např. pro venkovní sítě) je pak nutné mít k dispozici naměřené hodnoty. Při běžných výpočtech, zejména v závodových sítích je problém opačný - vzhledem ke složitosti a proměnlivosti sítě (množství momentálně připojených spotřebičů a jejich výkon) je nutné provést takové zjednodušení, aby výsledek nejvíce odpovídal provozním podmínkám, ale současně aby model sítě byl snadno zhotovitelný a výsledky přehledné. Vlastní výpočet pak závisí na použitém programu. Snadno využitelný je program HARMON, který dokáže vypočítat impedanci sítě, vyšší harmonická napětí, vzniklá od polovodičových měničů (reprezentováno proudovými zdroji) a koeficienty zkreslení napětí. Síť lze zadávat buď ve formě náhradních modelových schémat, nebo ve formě značek a parametrů skutečných zařízení sítě. Pak není nutná ani znalost přepočítacích vzorců.

Pravidla pro tvorbu modelů

- a) Transformátory a reaktory - v závodových sítích mohou být transformátory:

I. VN/VN (VVN/VN) - jedná se o hlavní transformátory. Vždy uvažovat.

II. VN/NN - při modelech VN uvažujeme jen velké výkony, při modelech NN pak uvažujeme vždy.

III. Reaktor je nutné uvažovat vždy.

- b) Motory VN - motory na VN jsou obvykle na takové výkony, že jejich vliv je vysoký. To platí jak pro asynchronní, tak i pro synchronní motory. Pokud bude na společné sběrnici více motorů, lze je modelovat jako jediný motor s výkonem rovným součtu výkonů všech motorů.
- c) Venkovní a kabelové vedení VN - nejčastěji se provádí náhrada ve tvaru π článku. Kabely VN mezi jednotlivými rozvodnami (nad 100 m délky) je nutné vždy uvažovat. Kapacita se modeluje vždy, svodový odpor pouze u dlouhých vedení VN. U venkovních vedení kapacitu stačí uvažovat nad 500 m.
- d) Kondenzátory - je nutné vždy modelovat. Pozor v případě automatických kompenzačních stanic - zde je nutné výkon stanice (a tím kapacitu kondenzátoru) při způsobit uvažovanému výkonu modelovaných spotřebičů s induktivním charakterem.
- e) Zátěže NN - pokud se provádí model VN, stačí zátěž NN modelovat jedine kombinací $R+jX_L$, případně doplněnou paralelní kapacitou. Pokud se provádí model NN, je možné zjednodušení provádět vždy o jeden stupeň transformace nižší nebo pouze u nízkých výkonů.
- f) Filtry - vzhledem k jejich určení je musíme modelovat vždy.
- g) Zdroje vyšších harmonických proudů - modelujeme pouze v případě, že potřebujeme provádět výpočty vyšších harmonických napětí.

1.2.2. Vyšší harmonické napětí

Uvažujeme-li polovodičový měnič jako proudový zdroj vyšších harmonických proudů, znamená to, že je do sítě dodáván konstantní proud a napětí stoupá úměrně s impedancí zátěže: $\bar{U}_n = \bar{Z}_n \bar{I}_n$

Toto napětí se potom skládá s napětím první harmonické (z napěťových zdrojů) a způsobuje zkreslení křivky napětí. Celkové napětí pak již neprochází nulou okamžiku, kdy jí prochází první harmonická a rovněž dosahuje hodnot, které mohou být rozdílné od hodnot jmenovitých. Na velikost a tvar zkreslení má vliv jak velikost napěťové harmonické, tak i její fázová poloha, která je dána polohou harmonického proudu.

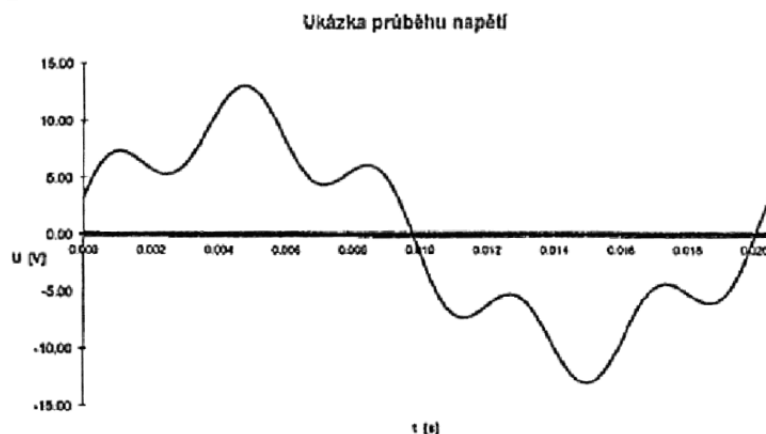
Pro jednoduchý odhad vyšších harmonických napětí stačí uvažovat pouze zkratový výkon sítě - pak má síť pouze induktivní charakter a můžeme psát:

$$\bar{U}_n = jnX_1\bar{I}_1 \quad (11)$$

Pokud použijeme zobecněný amplitudový zákon a z obr. 7 vztah pro výpočet impedance ze zkratového výkonu, dostaneme:

$$\bar{U}_n = jn \frac{U_1^2}{S_{KS}^*} \bar{I}_1 = j \frac{U_1^2}{S_{KS}^*} \bar{I}_1 \frac{\sin \frac{nd}{2}}{\sin \frac{d}{2}} \quad (12)$$

Jakmile připojíme paralelně k měniči další zátěž - např. asynchronní motor, pak výsledná impedance v místě připojení se sníží a sníží se tím i hodnoty harmonických napětí, neboť část harmonických proudů přebere paralelní zátěž. Jako ukázkou deformovaného průběhu vidíme na obr. 7 průběh, který lze zapsat ve tvaru : $u(t)=10 \cdot \sin(\omega t + 10^\circ) + 5 \cdot \sin(5\omega t + 30^\circ)$



Obr. 7 Ukázka průběhu deformovaného napětí

1. 3. Způsoby minimalizace harmonických

Úplné odstranění vyšších harmonických z napájecí sítě není možné. Prvním krokem, který je nutné učinit je zjištění, zda zkreslení není nadměrné. Jestliže ano, je třeba provést následující:

- určit oblast zkreslení,
- kontrolovat náhodné zrněny,
- určit, zda zkreslení vzniklá provozem určitého zařízení nebo v napájecím systému,
- určit metodu minimalizace každého zkreslení,
- provést korekci,
- ověřit vhodnost prováděných zásahů.

Vlastní minimalizaci vyšších harmonických a kompenzaci jalového výkonu lze provést:

- bez pomoci přídavných zařízení,
- s pomocí speciálních přídavných zařízení.

1.3.1. Omezení vyšších harmonických bez pomoci přídavných zařízení

Zvětšení počtu fází

Zvětšení počtu fází polovodičových měničů je velmi používaným způsobem pro omezení harmonických proudů, které tyto měniče generují do napájecí sítě. Pro dosažení těchto vlastností se mohou použít dva způsoby:

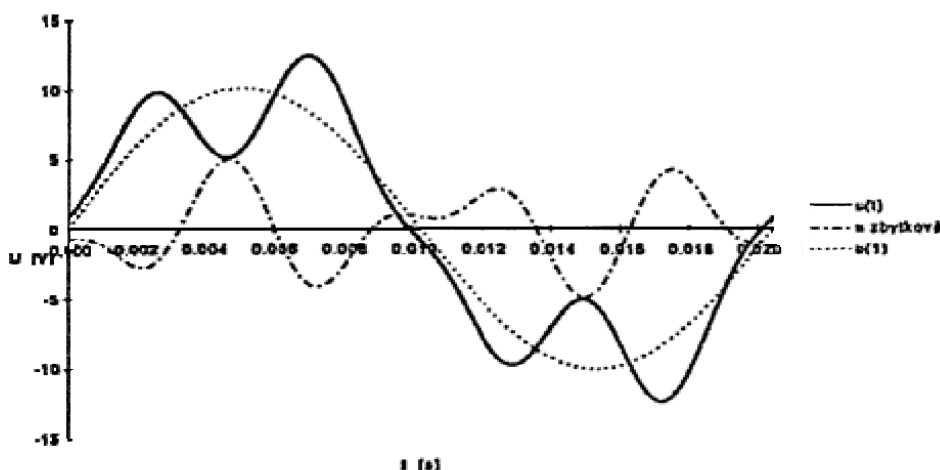
- a) použití napájecích transformátorů měničů se speciálním zapojením vinutí, které, dovolují realizovat potřebný vícefázový režim práce měniče
- b) zabezpečení takového režimu práce skupiny měničů, kde jednotlivé měniče mají menší počty fází, ale navenek se jeví jako vícefázové

Sériové a paralelní spojení usměrňovačů

Velmi častý způsob, který vede nejen ke snížení vyšších harmonických proudů, ale též ke zlepšení účinnosti první harmonické a např. i ke zvýšení pulznosti výstupního napětí. Jako příklad lze uvést postupné řízení sériově spojených usměrňovačů nebo tzv. "vystřídání řízení"

Injektování signálu do napájecí sítě

Odečteme-li základní harmonickou od nesinusového průběhu, dostaneme tzv. "zbytkovou křivku". Zhotovíme-li pak generátor, který bude vyrábět inverzi zbytkové křivky, po připojení tohoto generátoru na síť zůstane v síti pouze základní harmonická. Praktická realizace tohoto zařízení je velmi obtížná, neboť je potřeba provádět řízení generátoru v reálném čase a současně je v praktickém využití zapotřebí generátoru velkého výkonu. Samotný generátor pak může být sám zdrojem vyšších harmonických proudů. Ukázka principu je na obrázku 8.



Obr. 8 Princip generátoru zbytkové křivky

Pulzní usměrňovače

Pulzní usměrňovače se jeví jako velmi perspektivní usměrňovače, a to i z důvodů jejich vlastností vzhledem k napájecí síti. Výklad těchto usměrňovačů překračuje rámec této práce.

1.3.2. Omezení vyšších harmonických s pomocí přídavných zařízení

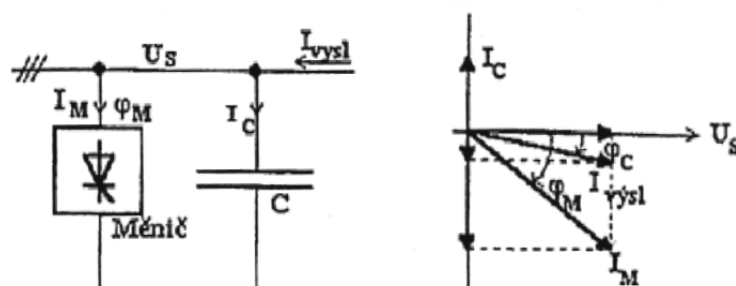
Dosáhne-li zkreslení harmonického průběhu vyšší než povolenou úroveň, či je-li rušení takové, že není možný provoz elektrických zařízení, pak pokud není výrobce zařízení schopen vyšší harmonické odstranit, je nutné použít přídavná zařízení pro potlačení, negativních vlivů. Pro snížení jalového výkonu se používají vhodné kompenzační zařízení pro omezení harmonických se používají různé filtry. Jako prvky přídavných zařízení se používají především kondenzátory, tlumivky a jejich vhodné zapojení. Protože filtraci nelze řešit odděleně od kompenzace (filtr je současně kompenzátorem), hovoříme o instalaci, filtračně - kompenzačního zařízení (FKZ). Při výběru vhodného odrušovacího zařízení je třeba brát v úvahu následující vlastnosti FKZ:

- možnost potlačení harmonických,
- schopnost symetrizace při nesouměrném zatížení sítě,
- rychlost zapůsobení kompenzačního zařízení,
- průběh proudu odebíraného FKZ,
- ztráty energie,
- výkon a váha FKZ, vztažené k výkonu zdroje rušení,
- investiční náklady a ekonomická efektivnost instalace FKZ

Základní způsoby a principy dodatečných zařízení:

Kompenzace účinníku pomocí kondenzátorů

Hlavním úkolem kondenzátorů je kompenzace jalového výkonu, a to buď v místě připojení měniče, nebo v místě umístění skupinové či centrální kompenzace. Kondenzátor je současně filtrem vyšších harmonických proudů ($X_c = 1/\omega C$). Z hlediska přizpůsobení se rychlým změnám zatížení je kondenzátor prvkem neproměnným, i když kondenzátorová baterie může být vybavena přepínáním počtu stupňů. Při připojení kondenzátorů je třeba dbát na to, aby kondenzátory nebyly trvale přetíženy. Princip kompenzace vyplývá z obr. 9. Pro výkon kondenzátoru pak můžeme psát:

$$Q_C = S_M \cos \varphi_M (\tan \varphi_M - \tan \varphi_C)$$


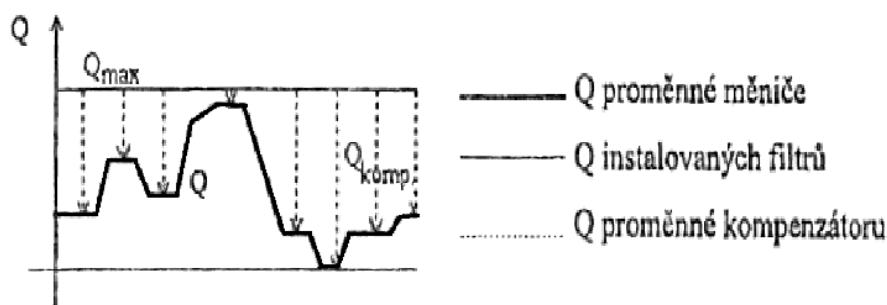
Obr. 9 Princip kompenzace účinníku

Synchronní kompenzátory

Synchronní kompenzátor lze pro řadu úvah nahradit plynule proměnným zdrojem napětí (úměrným magnetickému Toku stroje), připojeným přes reaktor X_k . Z tohoto důvodu se jeví synchronní kompenzátor jako zdroj jalového výkonu s rozsahem řiditelnosti plynule od záporných hodnot (induktivních) až po hodnoty kladné (kapacitní). Synchronní kompenzátor lze snadno regulovat při změnách pomalejších, než je časová konstanta budícího vinutí. To je dle provedení stroje od desetin sekundy až po sekundy. Pro kratší časy je ale nutné považovat synchronní kompenzátor za časově neproměnný, a tedy pro kompenzaci rychlých změn jalového výkonu, které vyvolávají polovodičové měniče, se jeví jako nevhodný.

Výkonové filtry vyšších harmonických

Použití filtrů je v současné době nejlepším způsobem pro minimalizaci vyšších harmonických, které se v el. sítích objevují. Protože bývá zatížení od měničů proměnné, lze použít kombinaci filtrů a některé ze způsobů rychlé kompenzace jalového výkonu. Filtry pak kryjí potřebu filtrace a určitého jalového výkonu (obvykle maximálního), kompenzátor pak kryje proměnlivý indukční výkon. Princip je na obrázku 10. Jinou možností je použití filtrů dimenzovaných na minimální výkon a k tomu přiřazení proměnné kapacity.



Obr. 10 Princip dynamické kompenzace na Q_{max}

Rychlá kompenzace jalového výkonu

Provozem polovodičových měničů může docházet k rychlým změnám odebíraného jalového výkonu. Protože velikostí odebíraných výkonů jsou navíc vysoké, nestačí se dynamika změn krýt postupným spínáním kondenzátorů či pomocí synchronního kompenzátoru. Pak je nutné použít jednu z metod tzv. dynamické kompenzace účinníku. Bližší výklad je v kapitole 1.3.3.

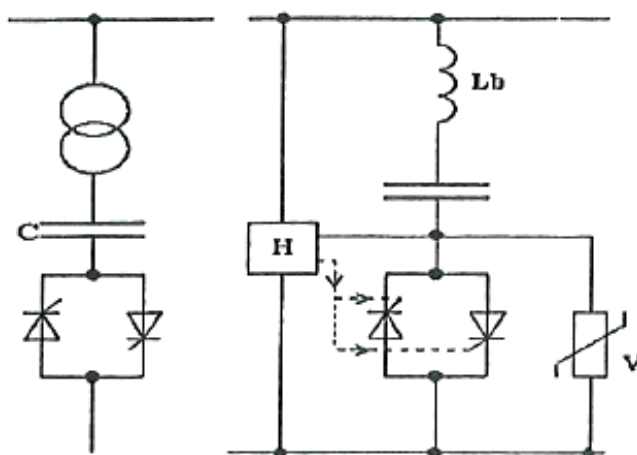
1.3.3. Dynamická kompenzace účinníku

Pojmem dynamická kompenzace účinníku rozumíme takovou regulaci, která je schopná zvládat velmi rychlé změny jalového výkonu, vyvolané provozem polovodičových měničů. V podstatě existují dva základní principy regulace:

- v laděných filtrech nebo v jiných zařízeních s konstantní kapacitou je nastavený takový kompenzační výkon, který se rovná minimálnímu potřebnému jalovému výkonu - zbylý induktivní výkon je dekompenzován rychlým spínáním kondenzátorů.
- v pevných kompenzačních zařízeních je nastavený maximální kapacitní výkon a přebytek této kapacity se pak odstraní spínanou indukčností - princip je znázorněn na obrázku 10.

Tyristorově spínané kondenzátory

Principiální schéma těchto zařízení je na obrázku 11.



Obr. 11 Principiální schéma tyristorově spínaných kondenzátorů

Podmínkou zapínání kondenzátorů bez nepřipustných přechodových jevů je, aby spínač zapínal přesně v okamžiku maxima síťového napětí a přitom aby zůstal kondenzátor od předešlého spínání nabitý na maximální hodnotu tohoto síťového napětí. Protože kompenzační kondenzátory ale obvykle nesnesou trvalé namáhání stejnosměrným napětím, rovným velikosti amplitudy jejich jmenovitého střídavého napětí, je třeba je po určitém počtu period síťového napětí přepólovat. Aby se snížilo nebezpečí rezonance a dále abychom zabráňovali nepříznivým provozním stavům, jako jsou velká strmá nárůsta proudu při chybném zapnutí tyristoru či nepřipustné napětěvé namáhání, jsou připojeny do série s kondenzátory tlumivky L_b . Obvody $L_b C$ musí být naladěny na frekvenci nižší, než je nejnižší kmitočet vyšších harmonických, které se v obvodu mohou vyskytovat. Obvykle se volí obvod laděný kolem 190 Hz. Tyto obvody se samostatně z důvodů nebezpečného nárůstu proudu velmi málo používají.

Tyristorově spínaná indukčnost

Proměnnou indukčnost L lze v podstatě realizovat třemi způsoby:

- tlumivkou se stejnosměrnou regulovatelnou předmagnetizací,
- řízeným usměrňovačem se stejnosměrným výstupem, ke kterému jsou připojeny tlumivky spojené nakrátko,
- tlumivkou s plynulým fázovým řízením indukčnosti.

Tlumivka se stejnosměrnou regulovatelnou předmagnetizací

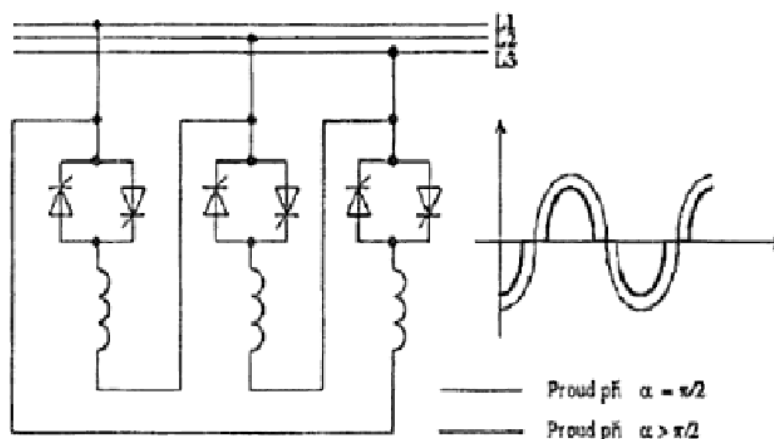
Jedná se v podstatě o trojfázový říditelný transduktor s vnitřní zpětnou vazbou, která je závislá na svorkovém napětí (využitelné pro stabilizaci napětí) nebo má budící vinutí pro nezávislou regulaci. Při použití je třeba speciální konstrukce pro potlačení vyšších harmonických silně zdeformovaného magnetizačního proudu. Do této skupiny je třeba zařadit i trojfázovou přesytku s přirozenou magnetizací. Do série s přesytkou se zařadí kondenzátorová baterie, čímž se dosáhne ploché přirozené charakteristiky. Automaticky se tak stabilizuje i napětí sítě. Tento způsob se používal dříve, dnes již transduktory a přesytky nejsou nasazovány.

Řízený usměrňovač s induktivní zátěží

Vlastnosti říditelné tlumivky má tyristorový usměrňovač se stejnosměrným výstupem zatíženým tlumivkou. Úhel řízení α se pohybuje v malém rozsahu hodnot blízkých se velikosti $\pi/2$. Zatímco fázové lineární tlumivky s tyristorovou regulací jsou i pro nesymetrické řízení fáze (protože každá fázová skupina má samostatné řízení), usměrňovač s jednou tlumivkou lze uplatňovat pouze při symetrickém řízení. Nevýhodou jsou rovněž nároky na přesnost řídicích impulsů - riziko havarijních stavů. Další nevýhodou je nespojitá regulace při přechodu do chodu s přerušovanými proudy. Možnost současného řízení nesymetrického odběru vyšších harmonických by se musela řešit zapojením usměrňovačů ve všech třech fázích. Každý z těchto usměrňovačů by pak musel mít svoje individuální řízení.

Tlumivky s tyristorovým řízením

Tři jednorázové lineární tlumivky v sérii s fázově řízenými antiparalelními tyristorovými spínači jsou na obr. 12. Tímto principem lze regulovat induktivní jalový výkon podle potřeby. Tlumivky mohou být jednak spínány, jednak fázově řízeny. Při úhlu řízení $\alpha = 0^\circ$ až $\alpha = 90^\circ$ je proud maximální a sinusový. S dalším zvětšováním úhlu řízení vznikají na křivce proudu nulové prodlevy, při $\alpha = 180^\circ$ je proud nulový. Je třeba si ale uvědomit, že změny velikosti napětí tlumivky se mohou uskutečnit pouze v diskrétních časových okamžicích, tzn. můžeme regulovat pouze jednou v 1/2 periody.



Obr. 12 Zapojení pro regulaci ind. proudu 1. harmonické a průběh proudu pro různý úhel řízení

Takto spínaná tlumivka je však zdrojem dalších vyšších harmonických proudů, se kterými je nutné při návrhu filtračně kompenzační stanice počítat. Zapojením transformátoru do trojúhelníka odstraníme pouze harmonické, které jsou násobkem tří. Výhodou zapojení je ochrana tyristorů proti přepětí i nadproudům tlumivkou, takže při dobrém proudovém i napěťovém využití je tento způsob vhodný i pro VN a pro velké výkony. Další výhodou je to, že může pracovat i asymetricky, tj. může vyrovnávat nerovnoměrné odběry jalového proudu v jednotlivých fázích. Snadno se může měnit strategie řízení a tím se stává tento způsob velmi využívaný.

Kombinace spínaných kondenzátorů a indukčností

Vzhledem k předpokládanému rozvoji spínací a řídicí techniky (i pro velké výkony) se považuje za nejperspektivnější. Vhodnou kombinací výkonů ve spínaných kondenzátorech a ve spínané tlumivce můžeme docílit prakticky plynulé regulace proudu. Dále lze minimalizovat vyšší harmonické proudy, které jsou generovány provozem spínané tlumivky. Nevýhodou jsou zatím potíže se spínáním kondenzátorů.

1. 4. Vliv harmonických na napájená elektrická zařízení

Vyšší harmonické proudy a jimi vyvolaná vyšší harmonická napětí jsou pro provoz elektrických zařízení rušivé veličiny. Spektrum vyšších harmonických je teoreticky nekonečné, a proto se jejich rušivý účinek může projevit v celém oboru frekvencí, používaných v elektrotechnice, a to různými způsoby,

- Způsobují zkreslení napěťové křivky. To může mimo jiné způsobit i poruchy v řízení polovodičových zařízení. Napětí dosahuje vyšších hodnot než jmenovitých a v křivce napětí se mohou objevit nepřipustné špičky. To pak může způsobit poruchy v obvodech automatického řízení a výpočetní techniky.

- Zkrácení doby života izolace el. strojů, transformátorů, kabelů a kondenzátorů. Odpisy na instalované zařízení, náklady na běžné a generální opravy musí být větší, než při sinusovém napájení.
- Doplňkové činné ztráty v elektrických strojích točivých i v transformátorech, ve venkovních i kabelových vedeních a v kondenzátorových bateriích. Tyto ztráty se projevují zejména zvýšeným celkovým i místním oteplením. U synchronních strojů se projeví především oteplením tlumiče, který není obvykle na vyšší harmonické dimenzován. U asynchronních motorů je rotor dimenzován na trvalý proud. Ten má malou frekvenci a pro proudy vyšších harmonických je relativně velký. Přídavné ztráty proto zde nehrají velkou roli.
- Zvětšují se činné odpory vlivem povrchového jevu. Tím se zvětšují i činné zirály a klesá i zatížitelnost vodičů.
- S frekvencí klesá kapacitní reaktance kondenzátorů, takže kondenzátory (kompenzační), připojené na síť s obsahem vyšších harmonických mohou být proudově přetíženy.
- Vzniká rezonance v síti s připojenými kondenzátory. To je pak příčinou přepětových jevů.
- Způsobují zvýšenou hlučnost motorů a transformátorů.
- Způsobují rušení rozhlasového a televizního příjmu a jiných telekomunikačních zařízení.

Velikost a dosah rušivých jevů závisí na výkonu zdroje, na obsahu a velikosti vyšších harmonických proudů, na parametrech elektrické sítě a na frekvenci. Příznivý účinek mají činné odpory, které omezují přepětí a absorbují energii vyšších harmonických. Kapacity transformátorů, přístrojů a strojů, vedení venkovních a zvláště kabelových, kompenzačních kondenzátorů omezují šíření harmonických vyšších frekvencí do větších vzdáleností od zdroje rušení, na druhé straně, ale mohou být zdrojem rezonancí a s tím spojených problémů.

2. Rezonance v napájecím obvodu 1-fázové vozby [5],[7]

Trakční obvod jednofázové soustavy je v principu složen mimo ohmické složky z indukčností a kapacit. Taková skladba elektrického obvodu, pokud jsou ohmické složky malé, vede k možnosti vzniku elektrických rezonancí, jejichž kmitočet závisí především na parametrech trakčního obvodu a dále na kmitočtu budícího elektrického rozruchu.

V případě jednorázových hnacích vozidel dochází během každé periody napájecího napětí nejméně ke dvěma podstatným změnám (spínacím pochodům) v náhradním obvodu vozidla, které způsobují deformaci odebíraného proudu, procházejícího též trakčním vedením do trakční transformovny a dále do napájecí vysokonapěťové sítě.

Proud odebíraný hnacím vozidlem je deformován podle známých zákonů komutace jednorázového dvou cestného usměrňovače a spektrum jeho vyšších harmonických je známé. Tyto deformace jsou v prvním přiblížení prakticky nezávislé na tvaru napájecího napětí, pokud zkrácení tvaru napětí nepřestoupí určitou mezní hodnotu, které však v praxi obvykle není dosaženo.

Z toho vyplývá, že jednorázové hnací vozidlo můžeme považovat za proudový zdroj vyšších harmonických o známém složení.

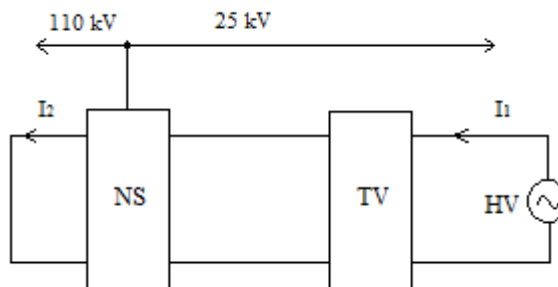
Souhmem lze říci, že trakční obvod můžeme obecně považovat za dlouhé vedení (představované trakčním vedením), buzené v jistém bodu z proudového generátoru vyšších harmonických (hnací vozidlo). Při jednostranném napájení je jeden konec tohoto dlouhého vedení otevřen, druhý konec je přiveden do trakční transformovny k sekundárnímu vinutí trakčního transformátoru.

Použijeme nejjednoduššího náhradního schématu trakčního transformátoru, sériové impedance Z_T (dané rozptylovou reaktancí trakčního transformátoru a jeho ohmickými odpory) a budeme předpokládat, že napájecí síť 110 kV je nekonečně tvrdá. V takovém případě je uvažované dlouhé vedení v bodě trakční transformovny ukončeno pouze touto náhradní impedancí Z_T .

Proudy jednotlivých harmonických, procházející touto náhradní impedancí Z_T , jsou pak směrodatné pro vedlejší proudový vliv trakční transformovny na napájecí soustavu 110 kV.

2. 1. Odvození rezonanční frekvence a součinitele zvýšen proudu pro hnací vozidlo umístěné na vzdáleném konci napájeného úseku

Náhradní elektrický obvod, popisující trakční obvod pro daný účel, je na obr. 13. Podle naznačeného dělení si jej můžeme představit jako řetězové řazení dvou čtyřpólů, napájených proudovým zdrojem. Předpokládáme, že hnací vozidlo je v napájeném úseku jediné a že je umístěno u otevřeného konce trakčního vedení.



Obr. 13 Náhradní obvod pro odvození proudové rezonance při jednostranném napájení pro hnací vozidlo umístěné na vzdáleném konci napájeného úseku

TV – trakční vedení
HV – hnací vozidlo
NS – napájecí stanice

Pro vstupní napětí a proud čtyřpólu (U_1 a I_1) a pro výstupní hodnoty v (U_2 a I_2) platí podle obecné teorie čtyřpólu vztah

$$\begin{cases} U_1 = A \cdot U_2 + B \cdot I_2 \\ I_1 = C \cdot U_2 + D \cdot I_2 \end{cases} \quad (13)$$

kde značí koeficienty A, B, C, D vliv jednotlivých obvodových prvku čtyřpólu. Tyto Blondelovy konstanty jsou vázány vztahem

$$A \cdot D = 1 + B \cdot C \quad (14)$$

a mají tento fyzikální smysl:

konstanta A - poměr napětí naprázdno
konstanta B - má povahu a rozměr komplexní impedance
konstanta C - má povahu a rozměr komplexní admitance
konstanta D - poměr proudů nakrátko

Při zjednodušení obě konstanty B a C přecházejí na:

konstanta B - podélnou impedanci,
konstanta C - příčnou admitanci.

Tak na příklad pro čtyřpól vyjadřující dlouhé vedení (trakční vedení, tj. trolejové vedení se zpětným vedením kolejnicemi a zemí) platí obecně tyto vztahy:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \cosh gN = D_1 \\ B_1 &= Z_0 \sinh gN \\ C_1 &= \frac{1}{Z_0} \sinh gN \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

kde g je součinitel šíření rozruchu,

$$g = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \quad (16)$$

Z_0 je vlnová impedance,

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (17)$$

kde značí N délku napájeného úseku (km)

R_0 - měrný odpor trakčního vedení (Ω/km)

L_0 - měrnou indukčnost téhož obvodu (H/km)

G_0 - měrný svod téhož obvodu (S/km)

C_0 - měrnou kapacitu téhož obvodu (F/km)

Pro čtyřpól reprezentující náhradní impedanci, trakčního transformátoru napájecí stanice Z_T platí

$$A_2 = D_2 = 1$$

$$B_2 = Z_T = R_T + jnX_T$$

$$C_2 = 0 \quad (18)$$

kde n je násobek zkoumaného kmitočtu vůči 50 Hz, přičemž možno oprávněně předpokládat, že činná složka nebude tak výrazně ovlivněna změnou kmitočtu. Poměry při napájení tohoto řetězce čtyřpólů můžeme nejjednodušeji sledovat použitím náhradních matic.

Matice pro čtyřpól vyjadřující dlouhé vedení obsahuje prvky opatřené indexy 1 a má tvar

$$\|M_1\| = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cosh gN & Z_0 \cdot \sinh gN \\ \frac{\sinh gN}{Z_0} & \cosh gN \end{vmatrix} \quad (19)$$

Matice pro čtyřpól nahrazující trakční transformátor napájecí stanice má prvky opatřené indexy 2 a má tvar

$$\|M_2\| = \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & Z_T \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (20)$$

Matice celého elektrického obvodu, obsahujícího proudový zdroj vyšších harmonických (hnací vozidlo), dlouhé vedení (trakční vedení) a zakončovací impedanci (náhradní impedanci trakčního transformátoru napájecí stanice), je dána součinem dílčích matic

$$\|M\| = \|M_1\| \cdot \|M_2\| = \begin{vmatrix} A_1 A_2 + B_1 C_2 & A_1 B_2 + B_1 D_2 \\ C_1 A_2 + D_1 C_2 & C_1 B_2 + D_1 D_2 \end{vmatrix} \quad (21)$$

Výsledná matice (21) dovoluje analyzovat sledovaný obvod zcela obecně. Nás však zde především zajímá poměr proudu vyšších harmonických, který do obvodu vstupuje (je dán hnacím vozidlem) k proudu téže harmonické, který vystupuje v bodu napájecí stanice a vstupuje dále do napájecí sítě 110 kV (je roven proudu procházejícímu náhradní impedancí Z_T , protože podle přijatého předpokladu považujeme napájecí síť 110 kV za nekonečně tvrdou, tedy s nulovým vnitřním odporem).

Podle výše přijatého systému indexů označíme proud procházející hnacím vozidlem I_1 a proud procházející napájecí stanicí I_2 . Jejich vztah vyjádříme úměrností

$$I_2 = K \cdot I_1 \quad (22)$$

Koeficient této úměrnosti nazveme součinitelem zvýšení proudu a bude vyjadřovat, jak proudový rezonanční jev v daném obvodu zvětší proud rezonujícího kmitočtu v napájecí stanici ve srovnání s proudem téhož kmitočtu procházejícím hnacím vozidlem.

Součinitel zvýšení proudu K je zde za daných předpokladů definován pro případ, kdy v napájecí stanici je pouze náhradní impedance Z_T , tedy pro stav $U_2 = 0$. V tomto případě dosazením do druhé z rovnic (13) zjistíme, že

$$I_2 = \frac{1}{D} I_1 \quad (23)$$

takže platí, že

$$K = \frac{1}{D} \quad (24)$$

což jinak řečeno znamená, že součinitel zvýšení proudu K je roven z vratné hodnotě analogicky umístěného prvku výsledné matice celého obvodu, jak je uvedena pod (21).

Dostáváme tedy daným postupem jednoduše

$$\frac{1}{K} = D = C_1 B_2 + D_1 D_2 \quad (25)$$

V našem případě dvou čtyřpólů daných Blondelovými konstantami podle rovnic (15) a (18) a z nich vyplývajících dílčích maticemi podle výrazu (19) a (20) dostaneme dosazením do výrazu (25) přímo

$$\frac{1}{K} = \frac{Z_T}{Z_0} \sinh gN + \cosh gN \quad (26)$$

Součinitel šíření vlny g definovaný výrazem (16) má obecně komplexní charakter a je možno jej rozdělit na část reálnou a imaginární podle výrazu

$$g = b + ja \quad (27)$$

kde značí a fázovou konstantu
 b konstantu tlumení.

V praktických aplikacích, kdy je vždy

$$\omega L_0 \gg R_0 \quad \omega C_0 \gg G_0 \quad (28)$$

lze obě složky výrazu (27) vyjádřit přibližně těmito výrazy

$$\left. \begin{aligned} b &\doteq \frac{R_0}{2} \sqrt{\frac{C_0}{L_0}} + \frac{G_0}{2} \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \\ a &\doteq \omega \sqrt{L_0 C_0} = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{n\omega_1}{\omega_0} \\ \omega_0 &= \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = 2\pi f_0 \quad \omega_1 = 2\pi f_1 \\ f_1 &= 50 \text{ Hz} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

Další zjednodušení přináší vyloučení hyperbolických funkcí z výrazu (26). Proto použijeme z rozvoje funkce $\sinh bN$ pouze první člen, z rozvoje funkce $\cosh bN$ prvé dva členy. Platí tedy přibližně

$$\sinh bN \doteq bN \quad \cosh bN \doteq 1 + \frac{b^2 N^2}{2} \quad (30)$$

Toto zjednodušení je možné proto, že konstanta tlumení je pro dané konkrétní poměry malá. Dané vedení se blíží vedení beze ztrát, pro které by pak v limitu bylo $b = 0$. Pomocí tohoto zjednodušení a vazebních vztahů mezi funkcemi goniometrickými a hyperbolickými komplexního argumentu lze upravit výraz (26) na tvar s oddělenou částí reálnou a imaginární

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} &= \left(1 + \frac{R_T}{Z_0} bN + \frac{b^2 N^2}{2}\right) \cos aN - \frac{nX_T}{Z_0} \left(1 + \frac{b^2 N^2}{2}\right) \sin aN \\ &+ j \left\{ \frac{nX_T}{Z_0} bN \cos aN + \left[\frac{R_T}{Z_0} \left(1 + \frac{b^2 N^2}{2}\right) + bN \right] \sin aN \right\} \end{aligned} \quad (31)$$

Připomeňme zde, že výrazy v kulatých závorkách závisí číselně na hodnotě tlumení b pouze velmi málo, protože tyto členy jsou pro obvyklá N vůči jednotce zanedbatelné.

Pro praktické případy zjišťování rezonanční frekvence při proudové rezonanci postačí v prvním přiblížení studovat mezní případ, kdy zanedbáváme v trakčním obvodu všechny ohmické složky.

V daném případě to značí, že budeme předpokládat pro výpočet rezonanční frekvence $R_T = 0$ a dále též $b = 0$. což značně zjednoduší výraz (23)

$$\frac{1}{K} = \cos aN - \frac{n_R X_T}{Z_0} \sin aN \quad (32)$$

Případ rezonance v obvodu se zanedbanými ohmickými odpory vede ke vzniku nekonečných proudových hodnot, což v našem případě značí anulování výrazu (32), z čehož dostáváme podmínku rezonance:

$$\cotg a_R N = \frac{n_R X_T}{Z_0} \quad (33)$$

ze které určíme n_R jako násobek rezonančního kmitočtu vůči základnímu kmitočtu 50 Hz. Protože však také veličina a_R tuto hodnotu obsahuje (viz výraz 29), dosadíme za n_R výraz

$$n_R = \frac{a_R}{F} \quad (34)$$

kde veličina a_R má již tvar vzniklý úpravou druhého z výrazů (29) a nově zavedená veličina F je definována jako poměr základního kmitočtu napájecí sítě ($f_l = 50$ Hz) k vlastnímu kmitočtu dlouhého vedení f_0 podle vztahu

$$F = \frac{f_l}{f_0} = \frac{\omega_l}{\omega_0} \quad (35)$$

Rovnice určující rezonanční kmitočet (33) přejde za přijatých zjednodušení na tvar vhodný pro řešení

$$\cotg a_R N = \frac{X_T}{Z_0} a_R = \frac{X_T}{\omega_l L_0} a_R \quad (36)$$

kde značí X_o měrnou reaktanci trakčního vedení pro základní kmitočet 50 Hz. Násobek rezonujícího kmitočtu vůči 50 Hz n_R je pak dán hodnotou a_R stanovenou řešením rovnice (36) podle výrazu (34).

Tímto zjednodušeným postupem dává dále původní výraz (31) možnost zjistit pro hodnotu a_R , danou rovnicí (36), příslušný součinitel zvýšení proudu K , přičemž však nemůžeme již použít předpokladu o zanedbání všech ohmických odporů v trakčním obvodu ($R_T = 0$, $b = 0$), protože v tomto případě dostaneme pro K nekonečnou hodnotu. Výraz pro součinitele zvýšení proudu (jeho absolutní hodnota) v případě proudové rezonance má pak při použití zjednodušené podmínky rezonance (33) a dalším zjednodušením tvar

$$\frac{1}{K} \doteq \frac{n_R X_T}{Z_0} bN \cos a_R N + \left[\frac{R_T}{Z_0} \left(1 + \frac{b^2 N^2}{2} \right) + bN \right] \sin a_R N \quad (37)$$

Tento výraz lze dále zjednodušit zavedením vztahu

$$S = \frac{X_T}{X_0} \quad (38)$$

který je nezávislý na délce sledovaného úseku. Výraz (37) pak přejde po úpravách na tvar

$$K \doteq \frac{Z_0[2+(SF n_R)^2]}{2R_T + NR_0[1+(SF n_R)^2]} \quad (39)$$

kde je již zanedbán vliv R_T vůči X_T a místo konstanty tlumení b je dosazena první část výrazu (29). Protože svod G_0 je též možno vůči ostatním parametrům zanedbat.

2. 2. Odvození rezonanční frekvence u součinitele zvýšení proudu pro hnací vozidlo umístěné v libovolném bodu napájeného úseku

Náhradní obvod, který tuto situaci popisuje, je znázorněn na obr. 14. Tento náhradní obvod se liší od obvodu na obr. 13 pouze tím, že připouští pokračování trakčního vedení ještě za místo připojení hnacího vozidla, které je také v tomto případě nahrazeno generátorem proudových harmonických.

Pro početní zpracování použijeme opět maticového vyjádření. Ve výpočtu budou vystupovat tyto matice:

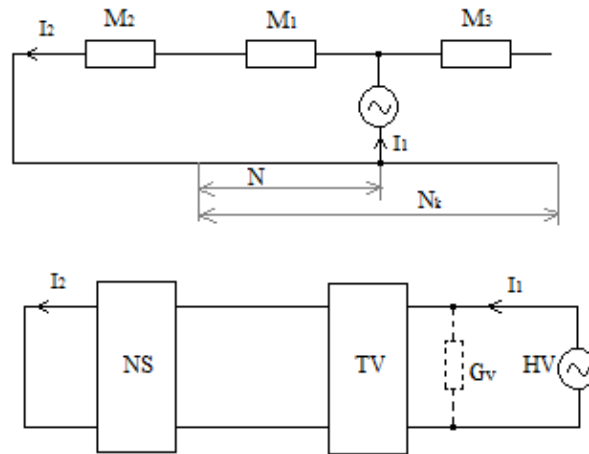
- $\|M_1\|$ platí jako v případě minulém pro úsek trakčního vedení mezi bodem připojení hnacího vozidla a napájecí stanicí (délku tohoto úseku značíme na obr. 14 písmenem N); prvky této matice a jejich označení přebíráme z výrazu (19);
- $\|M_2\|$ platí pro trakční transformátor napájecí stanice: také zde přebíráme její prvky a jejich značení z výrazu (20);
- $\|M_3\|$ je nová matice platí pro otevřený konec trakčního vedení o délce $N_K - N$, kde jako N_K značíme celkovou délku napájeného úseku.

Pro matici M_3 platí analogický výraz jako pro matici M_1 pouze s tím rozdílem, že trakční vedení zde má délku $N_K - N$ místo původní N . Dále nás bude zajímat z této matice pouze dvojice prvků, které definují impedanci otevřeného konce trakčního vedení podle výrazu

$$Z_{VSTUP} = \frac{A}{C} = \frac{1}{G_V} \quad (40)$$

Pomocí přepsané matice podle výrazu (19) a výrazu (40) lze odvodit výhodnější výraz pro vstupní vodivost G_V

$$G_V = \frac{1}{Z_0} \tanh g(N_K - N) \quad (41)$$



Obr. 14 Náhradní obvod pro odvození proudové rezonance při jednostranném napájení pro hnací vozidlo v libovolném místě napájeného úseku: a) umístění náhradních matic. b) vlastní náhradní obvod

Touto vodivostí lze pak jako jediným prvkem nahradit otevřený konec trakčního vedení, pokud nás zajímají elektrické poměry pouze v délce mezi hnacím vozidlem a napájecí stanicí. Protože tento náhradní prvek bude připojen paralelně k náhradnímu proudovému zdroji harmonických, (paralelně ke hnacímu vozidlu), zjednoduší se také jeho matice na tvar

$$\|M_3\| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ G_V & 1 \end{bmatrix} \quad (42)$$

Matice celého elektrického obvodu platící pro takto upravené náhradní schéma (úprava je na obr. 14 vyznačena tečkované) vzniká opět postupným násobením jednotlivých matic v předepsaném, pořadí

$$\|M\| = \|M_3\| \cdot \|M_1\| \cdot \|M_2\| = \begin{bmatrix} A_1 & A_1 Z_T + B_1 \\ C_1 + A_1 G_V & Z_T(C_1 + A_1 G_V) + D_1 + B_1 G_V \end{bmatrix} \quad (43)$$

Z této výsledné matice nás obdobně jako v případě matice podle výrazu (21) zajímá pro výpočet proudové rezonance pouze člen čtvrtý, který analogicky s výrazem (25) určuje součinitel zvýšení proudu K : zde dostaneme obecnější výraz

$$\frac{1}{K} = (C_1 + A_1 G_V) Z_T + D_1 + B_1 G_V \quad (44)$$

Tento výraz pro $G_V = 0$ přechází na původní výraz (25).

Do výrazu (44) dosadíme nyní hodnoty jednotlivých prvků původních matic a dostaneme

$$\frac{1}{K} = \left[1 + \frac{Z_T}{Z_0} \tanh g(N_K - N) \right] \cosh gN + \left[\frac{Z_T}{Z_0} \tanh g(N_K - N) \right] \sinh gN \quad (45)$$

Analogicky jako v případě minulém použijeme výrazu (27) a zjednodušení (30) a upravíme výraz (45) na tvar, který dovolí přímé dosazení za jednotlivé prvky. Dostaneme tak výraz odpovídající původnímu (31), platící však pro libovolnou polohu hnacího vozidla v napájeném úseku

$$\begin{aligned} \frac{1}{K} = & \frac{b(N_K - N) \cos a(N_K - N) + j \left[1 + \frac{1}{2} b^2 (N_K - N)^2 \right] \sin a(N_K - N)}{\left[1 + \frac{1}{2} b^2 (N_K - N)^2 \right] \cos a(N_K - N) + j b(N_K - N) \sin a(N_K - N)} \cdot \\ & \cdot \left\{ \frac{Z_T}{Z_0} \left[\left(1 + \frac{1}{2} b^2 N^2 \right) \cos aN + j bN \sin aN \right] + bN \cos aN + j \left(1 + \frac{1}{2} b^2 N^2 \right) \sin aN \right\} \\ & + \frac{Z_T}{Z_0} \left[bN \cos aN + j \left(1 + \frac{1}{2} b^2 N^2 \right) \sin aN \right] + \left[\left(1 + \frac{1}{2} b^2 N^2 \right) \cos aN + j bN \sin aN \right] \end{aligned} \quad (46)$$

Tento výraz slouží v první řadě ke stanovení frekvence, na které dochází k proudové rezonanci. Protože však v obecném tvaru není řešitelný, použijeme skutečnosti, že rezonanční frekvence prakticky nezávisí na ohmických odporech v obvodu, a dosadíme $b = 0$, $R_T = 0$. Po úpravách dostaneme přibližný výraz

$$\frac{1}{K} \doteq \frac{1}{\cos a_R (N_K - N)} \left(\cos a_R N_K - \frac{n_R X_T}{Z_0} \sin a_R N_K \right) \quad (47)$$

Z tohoto výrazu dostaneme opět anulováním podmínku pro výpočet rezonančního kmítočtu

$$\cotg a_R N_K = \frac{n_R X_T}{Z_0} \quad (48)$$

Je pozoruhodné, že podmínka pro rezonanční kmítočet je za daných předpokladů nezávislá na umístění hnacího vozidla v napájeném úseku, tedy nezávislá na hodnotě N .

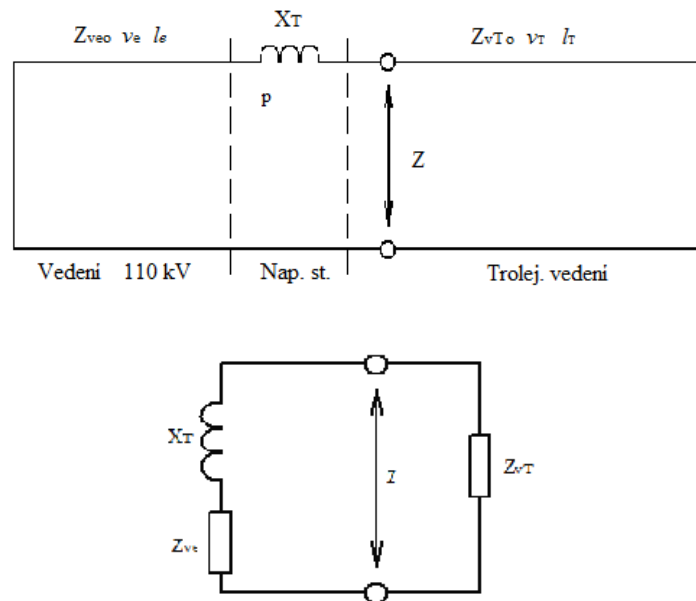
Při respektování nenulové hodnoty konstanty tlumení trakčního vedení b dochází ke snížení rezonančního kmítočtu při přemístění hnacího vozidla ze středu napájeného úseku k napájecí stanici asi o 50 až 100 Hz.

Zvláště pozoruhodné však je, že ani při umístění hnacího vozidla těsně u napájecí stanice (případ $N = 0$) není spektrum proudu na primární straně napájecí stanice totožné se spektrem proudu sběrače hnacího vozidla. Obě spektra se ztotožní pouze při zanedbání reaktance trakčního transformátoru (předpoklad $X_T = 0$), kdy výraz (47) dává identickou jednotkovou hodnotu.

Tento stav lze vysvětlit kvalitativně jen vznikem stojatých vln buzených hnacím vozidlem jako proudovým zdrojem, přičemž vazební reaktance umožňující buzení trakčního obvodu je minimálně tvořena reaktancí trakčního transformátoru, popřípadě pro N nenulové ještě příslušnou částí trakčního vedení ležícího mezi napájecí stanicí a hnacím vozidlem.

2. 3. Odvození rezonanční frekvence bez kompenzace

Při teoretickém odvozování rezonanční frekvence budeme vycházet z poznatku odvozeného v [2.1. 2.2.], že rezonanční frekvence prakticky nezávisí na poloze hnacího vozidla a budeme analyzovat stav, kdy je hnací vozidlo umístěno těsně u napájecí stanice. Náhradní obvod je znázorněn na obr. 15.



Obr. 15 Náhradní schéma napájení trakčního vedení 25 kV, 50 Hz

TV – trakční vedení napájené jednostranně

V – napájecí vedení 110 kV

X_T – náhradní reaktance transformátoru v napájecí stanici

Náhradní obvod obsahuje dva úseky (napájeny trakční úsek 25 kV a napájecí vedení 110 kV), které budeme uvažovat jako elektrická "dlouhá" vedení, tj.s prostorově rozloženými parametry. Oba tyto úseky jsou navzájem spojeny reaktancí, danou rozptylem trakčního transformátoru napájecí stanice. Trakční vedení napájeného úseku je při jednostranném napájení na vzdáleném konci otevřené. Naproti tomu vedení 110 kV je v místě připojení na nadřazenou soustavu 400 kV spojeno "nakrátko", protože lze již zcela oprávněně zanedbat vnitřní impedanci této nadřazené soustavy.

Obě „dlouhá“ vedení se liší vzhledem k rozdílnosti konstrukce a uspořádání vodičů jak ve svých základních elektrických parametrech (indukčnost, kapacita), tak přirozeně i v parametrech odvozených (vlnová impedance, činitel šíření, rychlost šíření).

Dále s výhodou využijeme již ověřený poznatek [6], že rezonanční kmitočet prakticky nezávisí na činných složkách uvažovaného obvodu a vzniklá nepřesnost je zanedbatelná ve srovnání s nepřesností výchozích elektrických údajů obou vedení i transformátoru. Zanedbáme proto v dalších

rozborech jak činnou složku podélné impedance (činný odpor R), tak i činnou složku příčné admitance (svod G).

Výsledná vstupní impedance ve zvoleném bodu připojení hnacího vozidla (těsně u napájecí stanice) je dána výrazem

$$Z = \frac{Z_{vT} (Z_T + Z_{ve})}{Z_v + Z_T + Z_{ve}} \quad (49)$$

ve kterém

Z_{vT} – vstupní impedance pro otevřené trakční vedení

$$Z_{vT} = -j Z_{vTo} \cot \frac{2\pi l_T}{v_T} f \quad (50)$$

Z_{ve} – vstupní impedance zkratovaného vedení 110 kV

$$Z_{ve} = j \frac{Z_{veo}}{p^2} \tan \frac{2\pi l_e}{v_e} f \quad (51)$$

Z_T – podélná impedance trakčního transformátoru v napájecí stanici, kterou při zanedbání činného odporu klademe

$$Z_T = j \frac{X_T}{50} f \quad (52)$$

Ve výrazech (49) až (52) značí:

- Z_{vTo} - vlnovou impedanci trakčního vedení (předpokládáme přibližně její nezávislost na kmitočtu) (Ω),
- Z_{veo} - vlnovou impedanci vedení 110 kV (opět předpokládáme její nezávislost na kmitočtu) (Ω),
- l_T - délku trakčního obvodu (km),
- l_e - délku energetického vedení 110 kV (km),
- v_T - rychlost šíření v trakčním vedení (km/s),
- v_e - rychlost šíření ve vedení 110 kV (km/s),
- p - převod trakčního transformátoru napájecí stanice,
- X_T - rozptylovou reaktanci transformátoru pro 50 Hz (Ω).

Výraz pro vstupní impedanci obvodu jako celku (49) vykazuje pro jisté kmitočty nulovou hodnotu, pro jiné kmitočty pak neomezenou hodnotu. Kmitočty, pro které vykazuje výraz (49) nulovou hodnotu, značí chod nakrátko. Protože původní obvod podle obr. 15 má dvě paralelně zapojené větve, může každá z těchto větví vykazovat nulovou vstupní impedanci pro své charakteristické kmitočty. Tak pravá větev náhradního schématu, představované otevřeným trakčním obvodem, vykazuje nulové hodnoty pro kmitočty dané výrazem

$$f_1 = \frac{v_T}{4l_T} k \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (53)$$

Analogicky pak i levá strana náhradního schématu vykazuje své vlastní kmitočty, pro které je vstupní impedance nulová. Tyto kmitočty jsou dány řešením rovnice

$$\frac{Z_{veo}}{p^2} \tan \frac{2\pi l_e}{v_e} f_2 = -\frac{X_T}{50} f_2 \quad (54)$$

Pro kmitočty podle výrazů (53) a (54) dochází v obvodu k sériové rezonanci. Celý obvod je pro tuto rezonanční frekvenci zkratován a při slušné harmonické složce, vyvozená hnacím vozidlem, se uzavírá bez zvláštních následků pouze jednou (rezonující) větví náhradního obvodu, aniž by vstupovala do větve druhé.

Výraz (49) pro vstupní impedanci obvodu vykazuje však pro jisté kmitočty neomezenou (nekonečnou) hodnotu. Pro tyto kmitočty dochází k paralelní rezonanci, které se pak účastní celý sledovaný obvod, tedy jak strana 110 kV, tak současně i obvod trakční. Kmitočet této paralelní rezonance dostaneme anulováním jmenovatele rovnice (49), tj.

$$Z_v + Z_T + Z_{ve} = 0 \quad (55)$$

Dosadíme-li do této rovnice výrazy (50), (51) a (52), dostaneme transcendentní rovnici pro rezonanční kmitočet f_3 ve tvaru

$$\frac{Z_{veo}}{p^2} \tan \frac{2\pi l_e}{v_e} f_3 = Z_{vTo} \cot \frac{2\pi l_T}{v_T} f_3 - \frac{X_T}{50} f_3 \quad (56)$$

Z rovnice (56) vyplývá, že její levá strana obsahuje parametry závislé pouze na stavu napájecího vedení 110 kV (jeho vlnovou impedanci, délku a rychlost šíření) včetně přepočtu vlnové impedance čtvercem závitového převodu trakčního transformátoru. Pravá strana této rovnice pak obsahuje pouze ty parametry, které jsou vlastní trakčnímu vedení (vlnovou impedanci, délku a rychlost šíření) a které charakterizují trakční transformátor (rozptylová reaktance).

Elektrické poměry v soustavě při paralelní rezonanci

Paralelní rezonance obvodu je stav, kdy v obvodu jako celku je vybuzen vnějším zdrojem (v daném případě ideálním proudovým zdrojem) proud s kmitočtem rovným kmitočtu oné paralelní rezonance.

Protože jsme zanedbali činné složky v celém obvodu, nevyžaduje tento obvod pro udržení kmitů přívod energie z vnějšího zdroje. Jinak řečeno, vstupní odpor tohoto obvodu je nekonečný, což odpovídá i matematické formulaci podmínky pro stanovení kmitočtu paralelní rezonance. Podstatné však je, že nakmitaný proud prochází obvodem, jako celkem prochází tedy v daném případě oběma jeho větvemi, větví představující přívodní vedení 110 kV i větví představující trakční vedení 25 kV.

Zvláště zajímavá pak je skutečnost, že rezonance se účastní celé délky obou vedení, tedy nikoliv pouze úsek mezi hnacím vozidlem a napájecí nadřazenou soustavou.

Další logický krok pro kvalitativní rozbor daného stavu vedení vyžaduje definování charakteru vstupní impedance dlouhého vedení v závislosti na kmitočtu. Z výrazu pro vedení nakrátko (51) a naprázdno (50) vyplývá, že při zachování hodnot konstant vedení Z_{vo} , l a v bude mít vstupní impedance Z charakter podle tab. 1.

Charakter Z_v pro dlouhé vedení		při kmitočtu
nakrátko	naprázdno	
0	∞	$f = 0$
induktivní	kapacitní	$0 < f < \frac{v}{4l}$
∞	0	$f = \frac{v}{4l}$
kapacitní	induktivní	$\frac{v}{4l} < f < 2 \frac{v}{4l}$
0	∞	$f = 2 \frac{v}{4l}$
Induktivní	kapacitní	$2 \frac{v}{4l} < f < 3 \frac{v}{4l}$
Atd.		

Tab. 1 Charakter Z_v pro dlouhé vedení

Z přehledu v tab. 1 vyplývá, že dlouhé vedení mění s kmitočtem svou vstupní impedanci tak, že ta může nabývat libovolných hodnot kladných i záporných (charakter induktivní i kapacitní).

Zvolíme-li si tedy například kmitočtový rozsah podle druhého řádku tab. 1, můžeme úsek napájecího vedení 110 kV nahradit ideální indukčností, jejíž hodnota plyne z výrazu

$$L_v = \frac{Z_{veo}}{2\pi f_n p^2} \tan \frac{2\pi l_e}{v_e} f_n \quad (57)$$

Podle náhradního schématu na obr. 1 je v sérii s touto náhradní indukčností zapojena rozptylová reaktance trakčního transformátoru X_j . Tyto dvě indukčnosti můžeme sečíst a dostaneme pro celou levou větev náhradního schématu z obr. 1 (platnou pro napájecí vedení 110 kV) náhradní indukčnost

$$L'_v = L_v + L_T = \frac{Z_{veo}}{2\pi f_n p^2} \tan \frac{2\pi l_e}{v_e} f_n + \frac{X_T}{2 \cdot 50} \quad (58)$$

Pokračujeme-li v této úvaze analogicky dále, můžeme takto odvozenou náhradní indukčnost napájecí strany nahradit pro touž frekvenci f_n jistou délkou l_T' vedení nakrátko, jehož parametry budou však shodné s parametry trakčního vedení. Platí pak tento vztah, udávající délku doplňkového úseku trakčního vedení nahrazujícího napájecí vedení 110 kV a trakční transformátor

$$l_T' = \frac{v_T}{2\pi f_n} \arctan \left(\frac{Z_{veo}}{Z_{vTo} p^2} \tan \frac{2\pi l_e}{v_e} f_n + \frac{X_T f_n}{Z_{vTo} 50} \right) \quad (59)$$

Připočteme-li k takto odvozené délce náhradního trakčního vedení ještě původní délku trakčního vedení l_T , dostaneme celkovou délku homogenizovaného kmitajícího vedení

$$l_c = l_T + l_T' \quad (60)$$

Vzhledem ke způsobu odvození je pochopitelné, že takto vypočtená celková délka náhradního vedení platí pouze pro kmitočet f_n . Pro jiný kmitočet bude mít celková délka l_c jinou hodnotu. Zvláště jednoduchý vztah pro náhradní délku vedení dostaneme pro kmitočet rovný kmitočtu paralelní rezonance původního obvodu jako celku. Tento rezonanční kmitočet je dán výrazem (56). Dosadíme-li z výrazu (56) do výrazu (59), dostaneme po úpravách pro náhradní délku trakčního vedení l_T' , která představuje pro daný kmitočet paralelní rezonance celého obvodu přírodní vedení 110 kV a rozptylovou reaktanci trakčního transformátoru

$$l_T' = \frac{v_T}{4f_R} - l_T \quad (61)$$

Použitím výrazu (60) pak dostaneme pro celkovou délku homogenizovaného vedení l_c výraz

$$l_c = \frac{v_T}{4f_R} \quad (62)$$

Po formální stránce tento výraz musí odpovídat výrazu (53), který však platil pouze pro skutečné trakční vedení.

Pro takto odvozené náhradní homogenizované dlouhé vedení platí tyto skutečnosti:

- vlastní rezonanční kmitočty nezávisí na místě, kde je připojen proudový zdroj,
- vstupní impedance mezi napájecími body je v případě zanedbání činných složek nekonečně nezávisle na poloze místa napájení,
- na vedení vzniknou stojaté elektrické kmity napětí a proudu (stojaté vlna),
- u zkratovaného konce vedení se vytvoří kmitna proudu a uzel napětí,
- na otevřeném konci se vytvoří kmitna napětí a uzel proudu,
- rozdělení proudu a napětí po délce náhradního homogenizovaného vedení je dáno zákonem sinusovky,
- hodnota proudu procházejícího kmitajícím vedením je závislá především na činných složkách jeho impedancí a její vztah k budicímu proudu (dodávanému hnacím vozidlem) je dán součinitelem zvýšení proudu K .

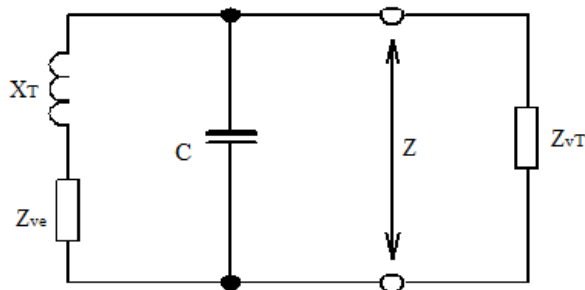
Aplikujeme-li tyto obecně platné skutečnosti na konkrétní situaci energetické soustavy 110 kV, napájející trakční obvod 25 kV, 50 Hz, dostaneme tyto závěry:

- a) Trakční vedení jednostranně napájeného úseku tvoří v podstatě konec vedení, které je na opačném konci zkratováno (v bodu připojení vedení 110 kV do nadřazené soustavy).
- b) Souhlasí-li rezonanční kmitočet paralelní rezonance obvodu jako celku s některou frekvencí dodávanou hnacím vozidlem, dojde v tomto obvodu ke vzniku stojatých vln proudu a napětí; na otevřeném konci trakčního vedení bude největší hodnota nakmitaného napětí, v místě

- připojení vedení 110 kV do nadřazené soustavy pak bude největší hodnota nakmitaného proudu.
- c) Vzniklé rušivé elektromagnetické pole nebude omezeno pouze na traťový úsek mezi hnacím vozidlem a napájecí stanicí, ale bude působit po celé délce napájeného úseku a bude pokračovat též podél vedení 110 kV.
 - d) Proud budící toto rušivé elektromagnetické pole je větší než proud dodávaný hnacím vozidlem a závisí především na činných složkách impedancí daného obvodu; jeho poměr k budicímu proudu dodávanému hnacím vozidlem je určen hodnotou součinitele zvýšení proudu K .
 - e) Na rozdíl od tohoto stavu způsobí ostatní harmonické složky proudu dodávaného hnacím vozidlem, jejichž kmitočet je rozdílný od kmitočtu paralelní rezonance obvodu jako celku, vznik elektromagnetického pole prakticky pouze mezi hnacím vozidlem a napájecí stanicí, aniž by došlo k rezonančnímu zvýšení proudu vznikem stojatých vln proudu a napětí.

2. 4. Odvození rezonanční frekvence s kompenzací

Analogicky také zde věnujeme pozornost změnám rezonanční frekvence, způsobovaným kompenzačním zařízením umístěným v napájecí stanicí. Budeme předpokládat, že na sekundární vinutí trakčního transformátoru je paralelně připojen kondenzátor proměnné kapacity. Použití kompenzačního kondenzátoru se projeví v náhradním schématu obvodu jako celku zvýšením počtu paralelních větví. Nové náhradní schéma je na obr. 16.



Obr. 16 Náhradní schéma napájení trakčního vedení 25 kV, 50 Hz s kompenzací jalového výkonu kondenzátorem C v napájecí stanicí

Ve výpočtových parametrech přibude pojem

Y_{CF} – značí admitanci použitého kompenzačního kondenzátoru kapacity C (F) při kmitočtu

$$Y_{CF} = j2\pi fC \quad (63)$$

Postup výpočtu je stejný jako v kapitole 2.3. Odvodíme nejdříve výraz pro vstupní impedanci obvodu jako celku

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{vT}} + \frac{1}{Z_T + Z_{ve}} + Y_{cf}} \quad (64)$$

a budeme sledovat extrémní hodnoty Z .

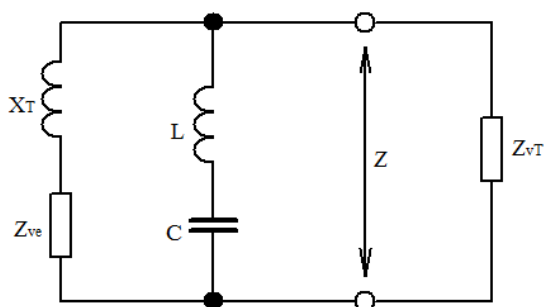
Kmitočty, pro které vstupní impedance Z dostává nulové hodnoty (kmitočty sériové rezonance), jsou dány podmínkou anulování dílčích zlomků jmenovatele. Porovnáním s výrazem (49) a z něho stejným způsobem odvozenými výrazy (53) a (54) vidíme, že se polohy nulových bodů impedance Z nemění a hodnotou kompenzačního kondenzátoru. Tento poznatek souhlasí i s fyzikálním názorem, protože zkratované větvi můžeme přiřadit paralelně libovolný elektrický obvod, aniž by se nulové impedance celku nějak změnila.

Kmitočty, pro které vstupní impedance Z dosahuje neomezených hodnot, jsou dány podmínkou anulování jmenovatele výrazu (64). Úpravou a dosazením definičních vzorců obvodových parametrů dostaneme pro výpočet kmitočtu paralelní rezonance transcendentní rovnici

$$\frac{Z_{veo}}{p^2} \tan \frac{2\pi l_e}{v_e} f_4 = \frac{Z_{vTo}}{\tan \frac{2\pi l_T}{v_T} f_4 + 2\pi Z_{vTo} \cdot C \cdot f_4} - \frac{X_T}{50} f_4 \quad (65)$$

Rozborem této rovnice a jejím srovnáním s dříve odvozenými rovnicemi (54) a (56) vidíme, že všechny mají společnou vlastnost, spočívající v možnosti oddělit na levou stranu rovnice vliv vedení 110 kV a převodu transformátoru napájecí stanice, na pravou stranu pak parametry trakčního obvodu a vliv kompenzačního kondenzátoru připojeného v napájecí stanici.

Druhou možností kompenzace je použít v napájecí stanici sériový rezonanční obvod L-C. S ohledem na výsledky získané v práci [6] budeme zde předpokládat, že vlastní kmitočet kompenzačního obvodu je naladěn na k -násobek základního kmitočtu sítě.



Obr. 17 Náhradní schéma napájení trakčního vedení 25 kV, 50 Hz s kompenzací jalového výkonu obvodem L-C v napájecí stanici

Způsobem analogickým jako v předchozím případě použijeme pro výpočet rezonančních kmitočtů náhradní obvod uvedený na obr. 17 a dostaneme pro vstupní impedanci obvodu jako celku výraz

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{vT}} + \frac{1}{Z_T + Z_{ve}} + \frac{1}{Z_{Ff}}} \quad (66)$$

kde Z_{Ff} je impedance větve L-C při kmitočtu f

$$Z_{Ff} = j \frac{\left(\frac{f}{50k}\right)^2 - 1}{2\pi C \cdot f} \quad (67)$$

Podobně jako v předchozím případě kompenzace samotným kondenzátorem dojdeme k závěru, že polohy kmitočtů sériové rezonance zůstávají nezměněné.

Naproti tomu kmitočty paralelní rezonance jsou ovlivněny přítomností kompenzační větve L-C a platí pro ně transcendentní rovnice

$$\frac{Z_{veo}}{p^2} \tan \frac{2\pi l_e}{v_e} f_5 = \frac{Z_{vTo}}{\tan \frac{2\pi l_T}{v_T} f_5 + \frac{2\pi Z_{vTo} \cdot C \cdot f_5}{1 - \left(\frac{f_5}{50k}\right)^2}} - \frac{X_T}{50} f_5 \quad (68)$$

Také tato rovnice není v obecném tvaru řešitelná. Vykazuje však opět výhodné oddělení konstant obou částí náhradního obvodu, což umožní její jednoduché řešení grafickou cestou.

3. Měření v trakční napájecí stanici Blansko [8],[9]

Ve dnech 20 - 21. 1. 2010 jsme provedli měření na TNS v Blansku. Přehledové schéma TNS Blansko je uvedeno v příloze 1.

Popis TNS

Rozvodna 110 kV řešena jako vnitřní, situovaná je v prvním patře objektu TNS. Použita je zapouzdřená rozvodna s izolací SF₆ od firmy ABB. Tvoří ji dvě odbočky na venkovní vedení 110 kV, podélná spojka přípojníc a dvě odbočky na trakční transformátory T101 a T102.

Trakční transformátory 110/27 kV jsou na straně 110 kV připojeny na sdružené napětí 110 kV. Na sekundární straně 27 kV mají jeden pól připojen přes rozvodnu 27 kV na trolejové vedení a druhý pól mají uzemněn a přes zpětné kabelové vedení spojen s kolejemi.



Obr. 18 Rozvodna 27 kV v TNS Blansko s naší měřicí aparaturou

Rozvodna 27 kV je řešena jako vnitřní, kobkové s 2x podélně dělenou přípojnící a je situována v samostatné hale budovy TNS (obr. 18).

FKZ zařízení jsou dvě, každé pro jeden trakční transformátor. Situována jsou pod přístřešky podél obou stran haly (obr. 19). FKZ zařízení je tvořeno dvěma filtračními větvemi (pro 3. a 5. harmonickou) a dekompenzační větví plynutě řiditelnou v rozsahu 0 - Q_{\max} . Filtry jsou navrženy na jmenovité napětí TNS (27 kV). Dekompenzační tlumivka a tyristorový regulátor jsou na napětí 5 kV, k trakčnímu obvodu jsou připojené přes jednofázový transformátor 27/5 kV.



Obr. 19 FKZ v TNS Blansko pro 3 a 5 harmonickou

Vlastní spotřeba TNS je napájena z transformovny 22/0,4 kV v areálu TNS, trojfázovou přípojkou přes oddělovací transformátor z rozvodu pro zabezpečovací zařízení v žst. Blansko (2 trojfázové přípojky 380/220 V, 50 Hz mezi nimi je automatický zások).

Popis měření

Na straně 110 kV:

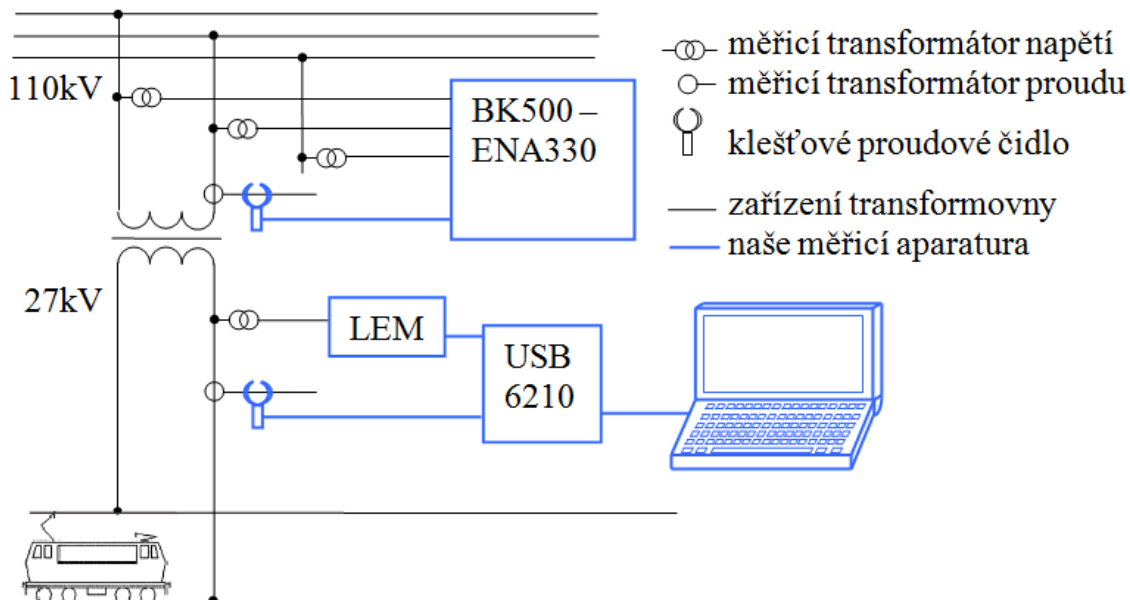
harmonické složky napětí od 1. do 40. pro všechny 3 fáze, efektivní hodnoty napětí pro všechny tři fáze, harmonické složky proudu od 1. do 40., efektivní hodnota proudu, činný výkon, $\cos(\varphi)$, λ , součinitel napěťové nesymetrie φ , činitel harmonického zkreslení THD pro všechny tři napětí a proud.

Na straně 27 kV:

harmonické složky napětí a proudu od 1. do 40., efektivní hodnoty napětí a proudu, činný výkon, fázový posuv φ , činitel harmonického zkreslení THD napětí a proudu.

K připojení naší měřicí aparatury byly využity měřicí převodníky instalované v transformovně (měřicí transformátory proudu a napětí). Naše měřicí aparatura byla do obvodu měřicích transformátorů napětí připojena přímo, do obvodu měřicích transformátorů proudu pomocí klešťových proudových čidel (bez nutnosti rozpojení obvodu). K měření na primární straně transformátoru (VVN) byl použit kalibrovaný analyzátor sítě BK500-ENA330. Měření na straně (VN) jsme použili měřicí

aparaturu vlastní výroby sestávající z Notebooku, měřicího převodníku USB6210, napěťových převodníků LEM a klešťového proudového čidla (způsob zapojení je na obr. 20).



Obr. 20 Zjednodušené schéma zapojení měřících přístrojů

Nejistota měření této sestavy byla vyčíslena na 1,5% pro měření napětí a 3,7% pro měření proudu. Sestava ovšem není zkalibrována, takže výsledky lze považovat pouze za informativní. Měřicí zařízení byla nastavena tak, vyhodnocovala a ukládala 5 sekundové průměry měřených veličin.

Vlastní měření

Před vlastním vyhodnocováním měření jsem zavedl zjednodušení a to zanedbáním všech sudých harmonických a lichých vyšších než 25 pro jejich velmi malé hodnoty.

V průběhu měření jsme měli možnost na půl hodiny odstavit FKZ, takže můžeme porovnávat hodnoty s normálním provozním stavem.

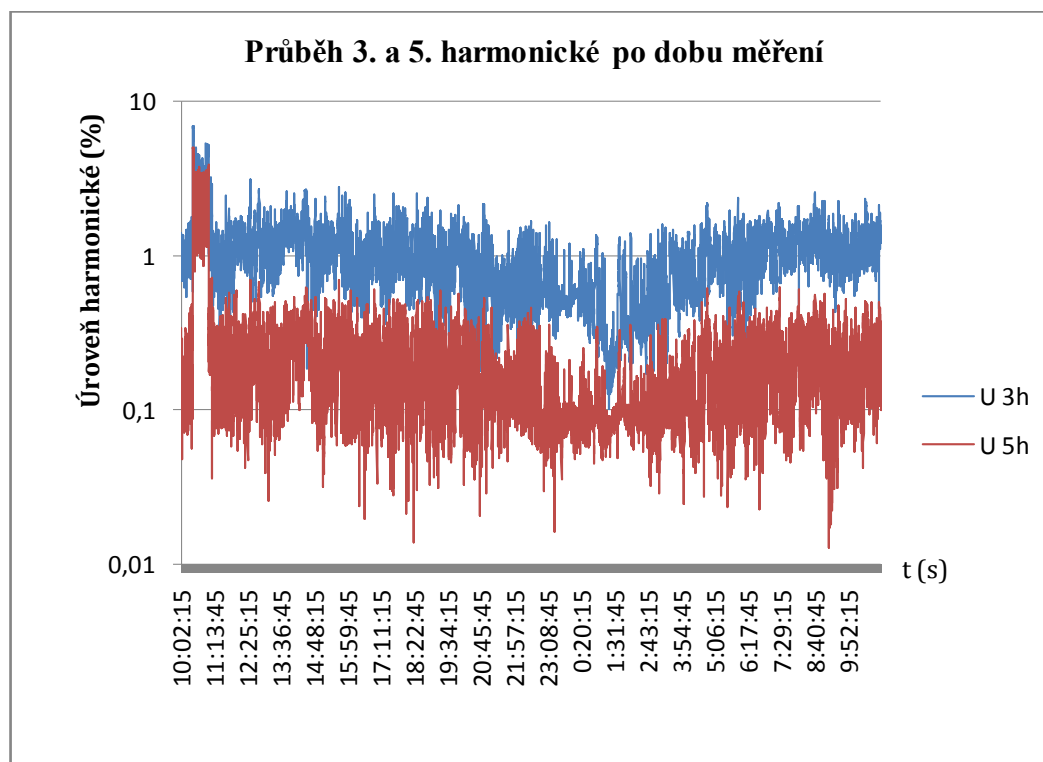
Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot napětí každé harmonické menší nebo rovno hodnotě uvedené v tabulce 2. U jednotlivých harmonických mohou rezonance způsobit napětí vyšší.

liché harmonické				sudé harmonické	
ne násobky 3		násobky 3			
řád harmonické h	harmonické napětí %	řád harmonické h	harmonické napětí %	řád harmonické h	harmonické napětí %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25					

POZNÁMKA: Úrovně pro harmonické vyšších řádů než 25 se neuvádějí, jelikož jsou obvykle malé, avšak vlivem rezonančních jevů obtížně předvídatelné.

Tab. 2 Úrovně jednotlivých harmonických napětí v předávacím místě v procentech U_n pro řady harmonických až do 25 dle ČSN EN 50160

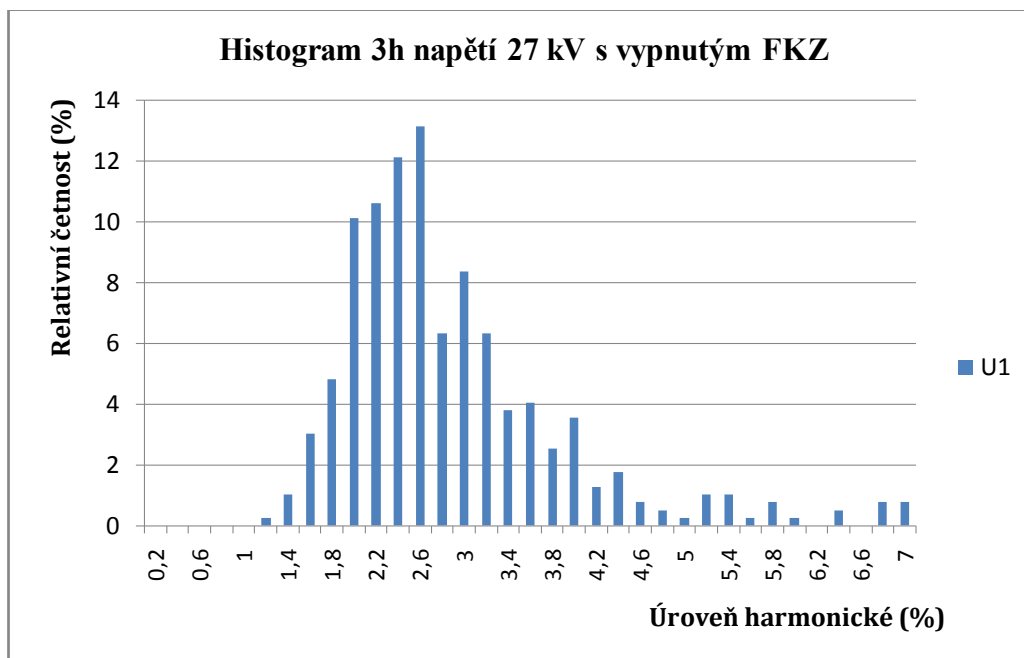
Naše měření se konalo pouze jeden den, takže srovnávání s ČSN EN 50160 je pouze orientační, i přesto, že naměřené hodnoty jsou pod hranicemi dané touto normou.



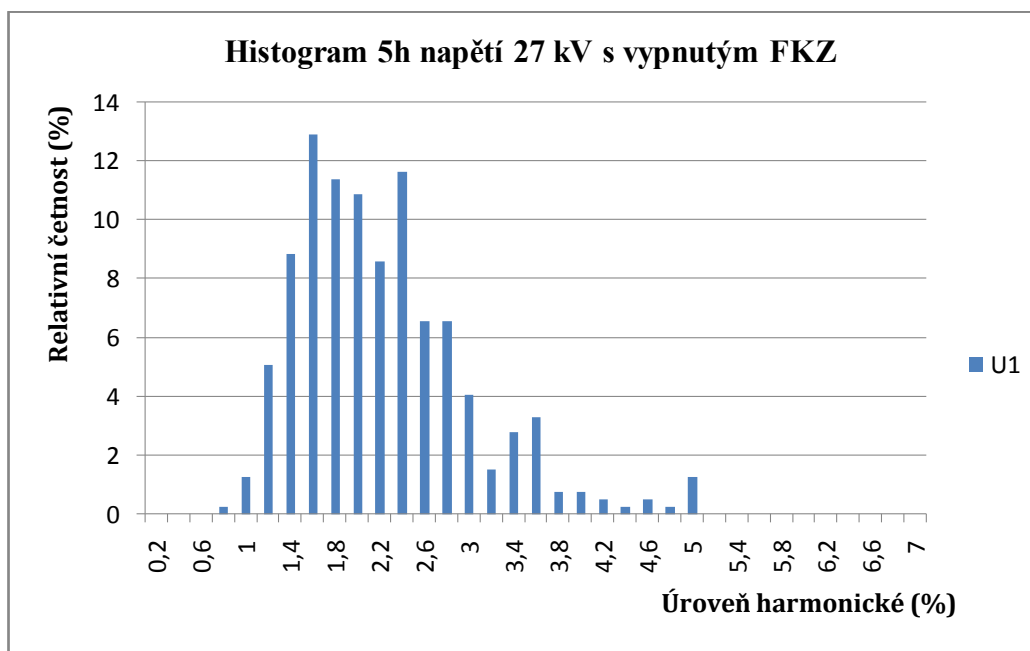
Graf 1 Hodnoty 3. a 5. harmonické v celé délce měření

Na grafu 1 je znázorněn průběh 3h a 5h v celé délce trvání měření. Je zde dobře vidět doba odpojeného FKZ a to přibližně v čase od 10:30 do 11:00. Z tohoto grafu by se těžko určovaly

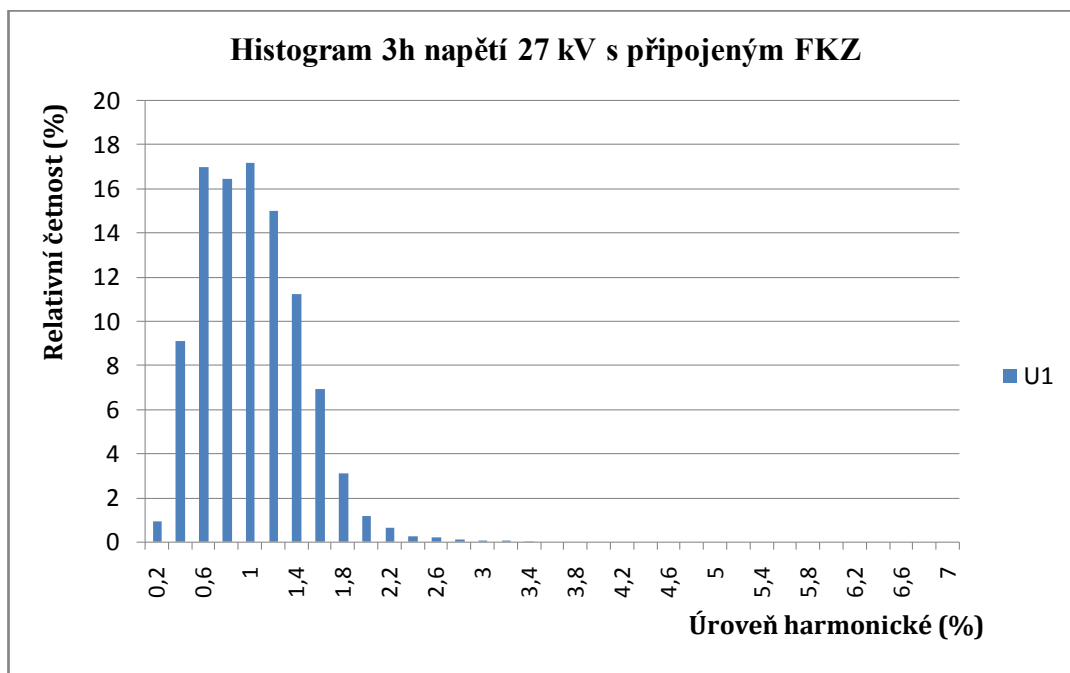
procentuální hodnoty pro srovnání s tabulkou 2. Proto jsem použil pro zpracování dat funkce histogram, která lépe zobrazuje výsledky našeho měření. Grafy 2 a 3 ukazují hodnoty 3. a 5. harmonické na sekundární straně trakčního transformátoru s odpojeným FKZ. Grafy 4 a 5 pro srovnání ukazují hodnoty relativní četnosti s připojeným FKZ. Všechny histogramy pro harmonické (3. – 23.) jsou uvedeny v příloze 2 jak pro případ s připojeným FKZ tak bez připojeného FKZ.



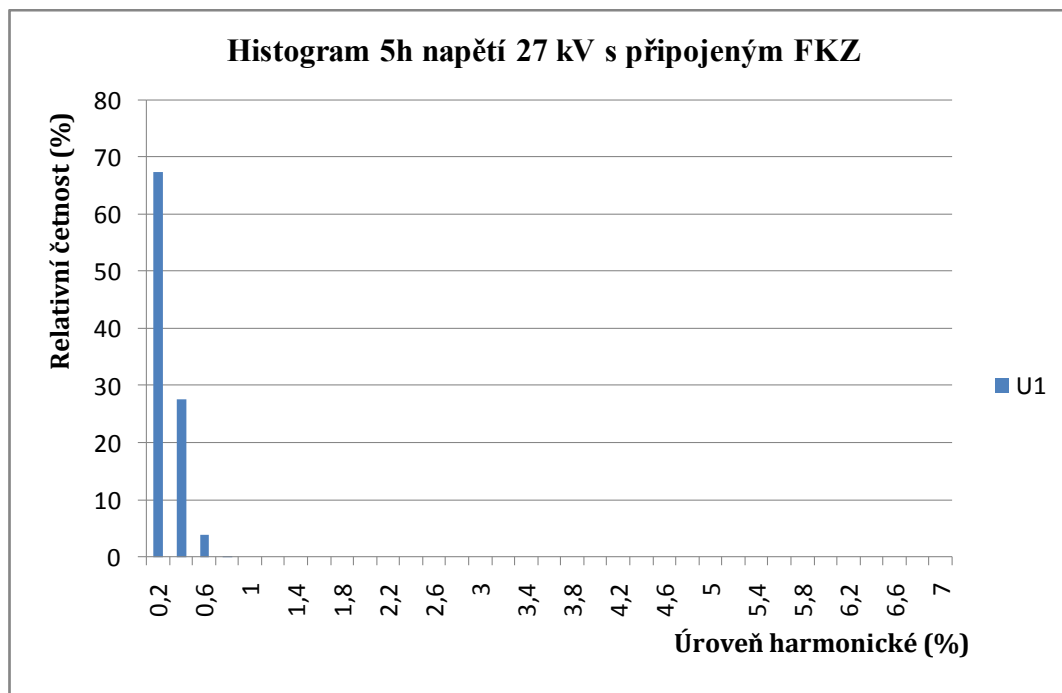
Graf 2 Relativní četnost 3. harmonické napětí 27 kV s vypnutým FKZ



Graf 3 Relativní četnost 5. harmonické napětí 27 kV s vypnutým FKZ

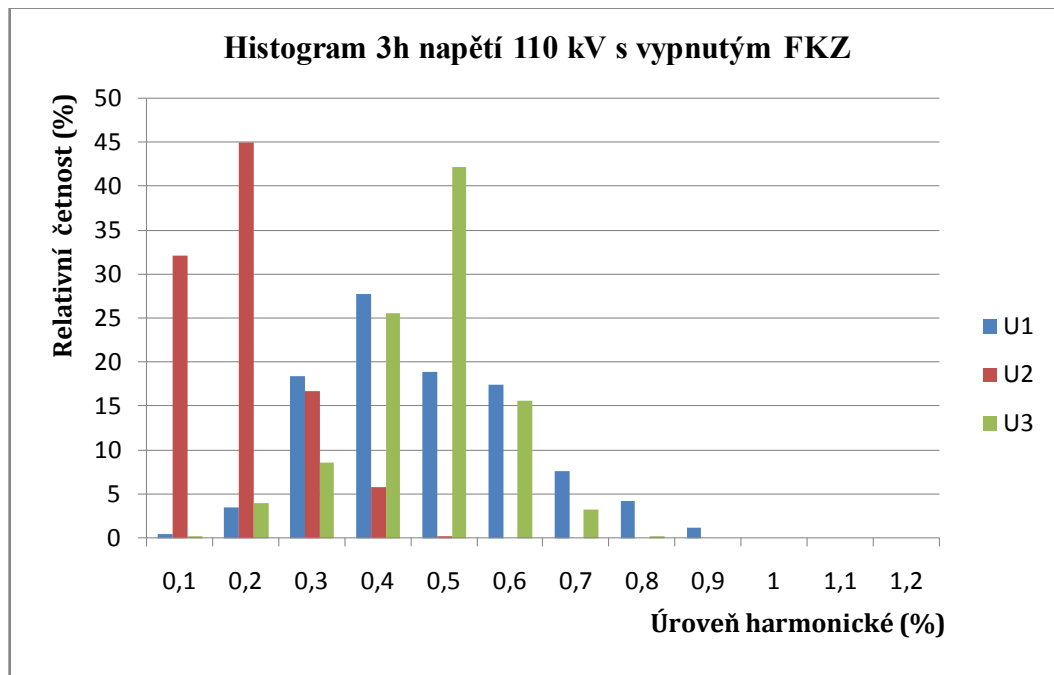


Graf 4 Relativní četnost 3. harmonické napětí 27 kV s připojeným FKZ

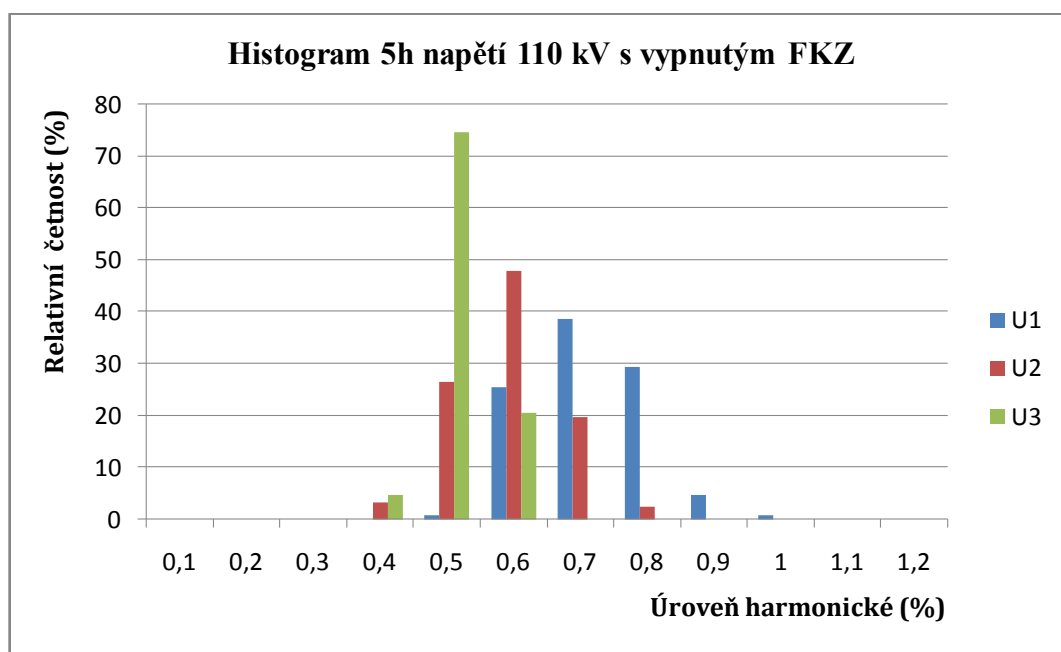


Graf 5 Relativní četnost 5. harmonické napětí 27 kV s připojeným FKZ

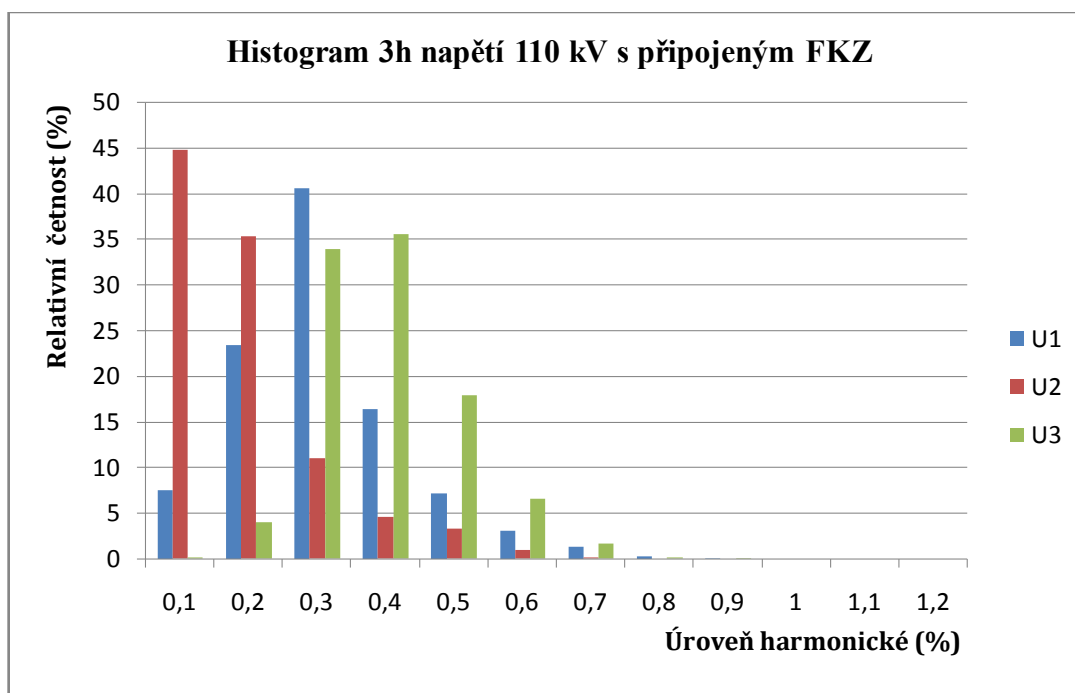
Stejné měření jsme provedli i na primární straně trakčního transformátoru. Grafy 6 a 7 ukazují hodnoty 3. a 5. harmonické bez připojeného FKZ. Na rozdíl od sekundární strany transformátoru se na primární straně měřila tři napětí, která jsou zobrazena v jednom grafu. Grafy 8 a 9 zobrazují hodnoty 3. a 5. harmonické z připojeným FKZ. Všechny grafy harmonických (3. – 23.) jsou uvedeny v příloze 3 a to s připojeným FKZ i bez připojeného FKZ.



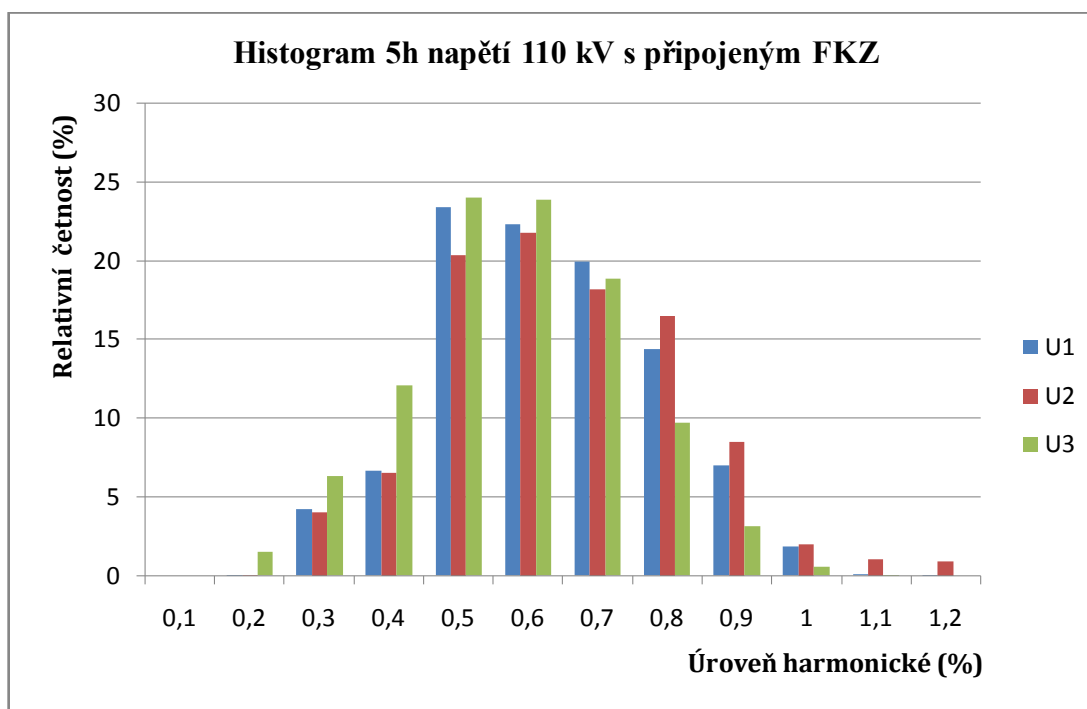
Graf 6 Relativní četnost 3. harmonické napětí 110 kV s vypnutým FKZ



Graf 7 Relativní četnost 5. harmonické napětí 110 kV s vypnutým FKZ

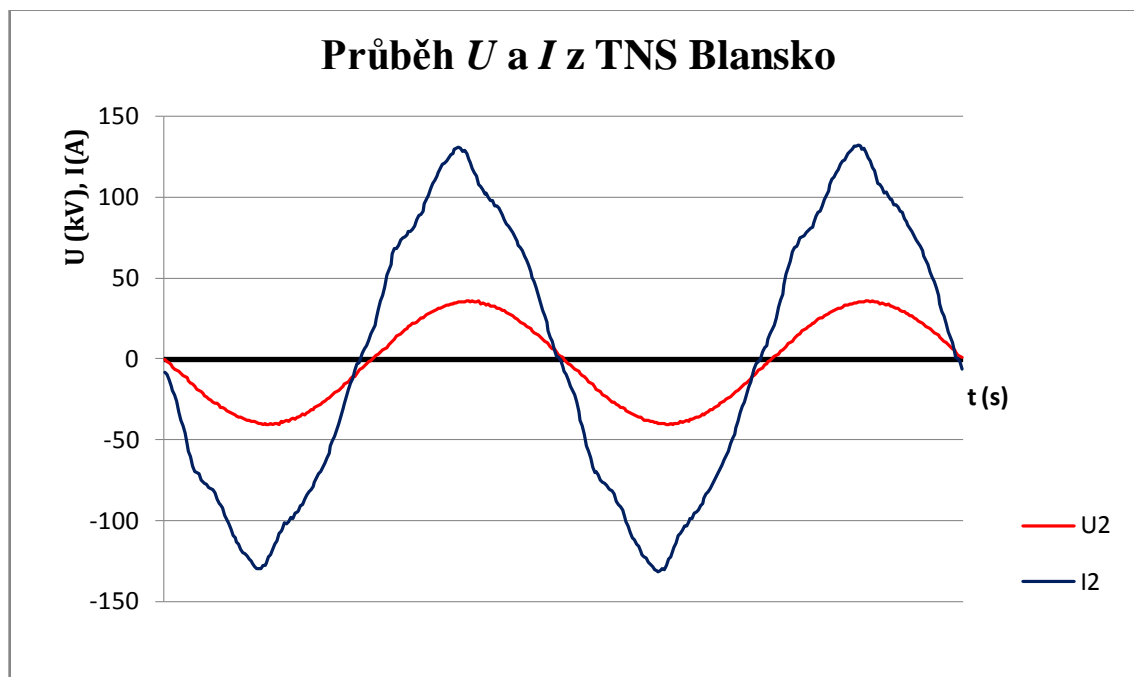


Graf 8 Relativní četnost 3. harmonické napětí 110 kV s připojeným FKZ

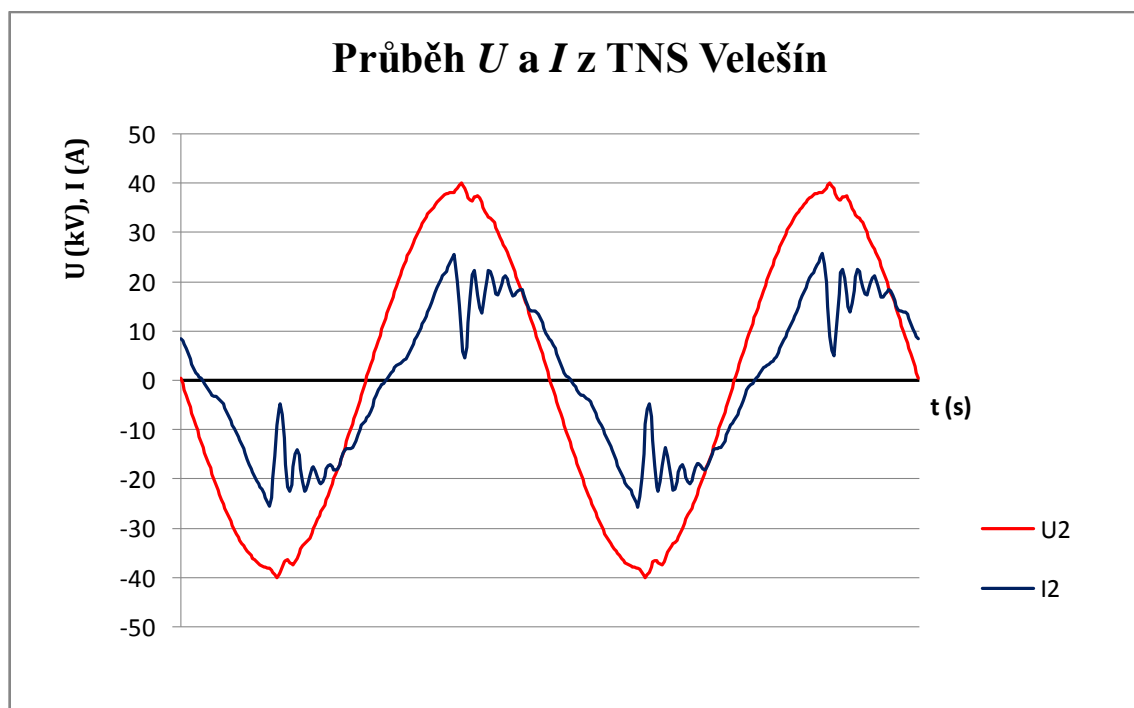


Graf 9 Relativní četnost 5. harmonické napětí 110 kV s připojeným FKZ

Jako poslední graf jsem chtěl uvést ukázkou deformace napětí a proudu při rezonanci v trakčním napájecím obvodu. V průběhu našeho měření určitě došlo k rezonanci, ale nepodařilo se nám nalézt důkaz, který by to zobrazil. Na grafu 10 je zobrazen průběh proudu a napětí z TNS Blansko. Jako ukázkou deformace sinusovky proudu jsem zobrazil hodnoty naměřené 18. července v TNS Velešín (graf 11).



Graf 10 Průběh napětí a proudu z TNS Blansko



Graf 11 Průběh napětí a proudu z TNS Velešín

4. Závěr:

Trakční napájecí soustava 25 kV 50 Hz je jedním z mnoha šířitelů, kteří do nadřazené sítě šíří rušivé vlivy způsobené jízdou lokomotiv, jakožto generátoru proudových harmonických (nesymetrie a rychlé kolísání odběru). Provedl jsem teoretický rozbor vlivu pulzních měničů na proud a napětí v síti, jejich způsoby šíření, ale také způsoby na možnosti jejich omezení. V jedné z kapitol uvádím také důsledky harmonických na elektrická zařízení. Paradoxem je, že zařízení se špatnou elektromagnetickou kompatibilitou může mít vliv na vlastní funkci nebo na zařízení v okolí. Což může mít za následek ekonomické ztráty v podobě špatného chodu nebo zničení zařízení.

Ve své práci jsem uvedl postup výpočtu rezonancí a součinitele zvýšení proudu v trakční napájecí soustavě 25 kV 50 Hz. Výpočet je proveden pro trakční napájecí vedení s připojeným FKZ a bez něj. A také s lokomotivou na začátku uvažovaného trakčního vedení a pro libovolnou vzdálenost trakčního vozidla v napájecím úseku. Geometrická délka napájeného úseku, elektrické parametry trakčního vedení a napájecího transformátoru určují frekvenci, na které dochází k rezonanci.

Součástí mé diplomové práce bylo i měření na trakční napájecí stanici Blansko, které bylo provedeno 20. – 21. 1. 2010. Jedná se o rekonstruovanou trakční napájecí stanici se zapouzdřenou rozvodnou 110 kV. Při tomto měření jsme neměřili pouze vyšší harmonické (1. – 40.) proudu a napětí, ale i výkon, $\cos \varphi$, λ , nesymetrii, činitel harmonického zkreslení a rezonance. Mým úkolem v rámci diplomové práce bylo srovnat a vyhodnotit rezonance a vyšší harmonické složky proudu a napětí. Naše měřicí sestava (notebook, USB převodníky) ovšem nebyla zkalibrována, takže získané a vyhodnocené výsledky jsou pouze informativní. Při zpracování dat byl použit program MS Excel. Pomocí funkce histogram jsem analyzoval data a zobrazil výsledky v grafech pro každou harmonickou. Měření se provádělo zároveň na primární (110 kV) a sekundární (27 kV) straně trakčního transformátoru. Jako nejvýrazněji rušivé se ukázaly být 3. a 5. harmonická, ale pouze v čase, kdy nám dispečer odpojil FKZ. V porovnání s hodnotami s připojeným FKZ byly hodnoty bez FKZ u 3. harmonické přibližně dvakrát vyšší. U 5. harmonické byl tento nárůst ještě vyšší a to asi na trojnásobek oproti normálnímu provoznímu stavu. Tento rozdíl je patrný i u dalších harmonických. Tyto zjištěné hodnoty jsem porovnával s hodnotami dle ČSN EN 50160. Musím opět zdůraznit, že toto měření bylo jen informativní, protože tato norma stanovuje dobu měření na týden. Ale mohu konstatovat, že i tak námi naměřené hodnoty nepřesáhly hodnoty uvedené v ČSN EN 50160.

V celé délce našeho měření jsme rezonance nezaznamenali, pokud k nějakým došlo, tak byly tak malé, že jsme je nepostřehli.

5. Použitá literatura

- [1] Paleček, J.: Napájení jednofázové vozby Českých drah z hlediska elektromagnetické kompatibility, VŠB-TU Ostrava, Ostrava 2000
- [2] Kůs, V.: Rušivé vlivy měničů a jejich omezování, Výkonová elektronika svazek IV, Plzeň 1996
- [3] Vaculíková, P. a kol.: Elektromagnetická kompatibilita elektrotechnických systémů, Grada 1998
- [4] Hlava, K.: Elektromagnetická kompatibilita drážních zařízení, Pardubice 2004
- [5] Hlava, K.: Proudová rezonance v trakčním obvodu jednofázové soustavy 25 kV 50 Hz, Sborník prací VUŽ č. 4, 1975
- [6] Hlava, K.: Proudová rezonance v trakčním obvodu jednofázové soustavy 25 kV 50 Hz s kompenzací, Sborník prací VUŽ č. 7, 1975
- [7] Hlava, K.: Rezonance v soustavě napájecí trakční obvod 25 kV 50 Hz, Sborník prací VUŽ č. 11, 1976
- [8] Materiály z napájecí stanice Blansko
- [9] ČSN EN 50160 Charakteristiky napětí el. energie dodávané z veřejné distribuční sítě
- [10] <http://cdrail.cz> oficiální website Českých drah

6. Seznam příloh

1. Schéma TNS Blansko

2. Grafy 7 – 23 harmonické napětí 27 kV
3. Grafy 7 – 23 harmonické napětí 110 kV

